

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra automatizační techniky a řízení

**Soubor úloh z oblasti regulace pro předmět Základy automatizace**  
**Exercices Supporting Lectures on Control System Fundamentals**

Student: Ondřej Ilčík

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Wagnerová Renata, Ph.D.

Ostrava: 2012

## Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Ilčík**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **3902R001 Aplikovaná informatika a řízení**  
Téma: **Soubor úloh z oblasti regulace pro předmět Základy automatizace  
Exercices Supporting Lectures on Control System Fundamentals**

Zásady pro vypracování:

1. Popište laboratorní modely regulace tlaku a polohy v laboratoři H310, jejich hardwarové a softwarové vybavení.
2. Určete matematický model vybraných laboratorních modelů, využijte metody analytické nebo experimentální identifikace. Vytvořte simulační modely a jejich správnost verifikujte.
3. Pro zvolené modely navrhnete konvenční regulátory typu PID a verifikujte je jak pomocí číslicové simulace, tak i přímo na laboratorním modelu.
4. Vytvořte soubor úloh pro samostatnou práci studentů v předmětu Základy automatizace.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhnete směry dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

BALÁTEĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN 80-7300-020-2.  
DORF, R. C. & BISHOP, R. H. *Modern Control Systems*. Addison-Wesley: Harlow England 1998. ISBN 0-201-30864-9.  
HIKL, J. *Návrh regulátorů pro soustavy s dopravním zpožděním*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2008. 58 str. Bakalářská práce, vedoucí: Vítečková, M.  
LOS, J. *Analýza a syntéza vybraného technologického procesu*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2007. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.  
ŠULC, B. *Teorie automatického řízení s počítačovou podporou*. Praha: ČVUT, 1999. 153 str. ISBN 80-01-01974-B.  
VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. 2. přepracované vydání. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, 246 str. 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

*Tůma*

prof. Ing. Jiří Tůma, CSc.  
vedoucí katedry



*Farana*

prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové (bakalářské) práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové (bakalářské) práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: .....

## ANOTACE

Ilčík, O. *Soubor úloh z oblasti regulace pro předmět Základy automatizace*. Ostrava: ATŘ – 352 VŠB – TUO, 2012. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.

Tato práce se zabývá popisem laboratorních modelů regulace rychlosti průtoku a polohy, jejich analýzou a syntézou. U modelů bylo popsáno jejich softwarové a hardwarové vybavení. Pomocí metod experimentální identifikace byl zjištěn matematický popis modelů regulace průtoku a polohy. V prostředí MATLAB/Simulink byly vytvořeny simulační modely. Matematické popisy byly ověřeny porovnáním simulace s naměřenými daty. Popsanými metodami syntézy byly pro každý model navrženy regulátory a jejich stavitelné parametry. Jejich správnost byla ověřena jak simulačně tak přímo na modelech. Na konec byl navržen soubor úloh pro samostatnou práci studentů v předmětu Základy automatizace.

## ANNOTATION

Ilčík, O. *Exercises Supporting Lectures on Control System Fundamentals*. Ostrava: Department of Control Systems and Instrumentation, Technical University of Ostrava, 2012. Thesis, head: Wagnerová, R.

This work deals with the description of laboratory models regulation flow rate and position, their analysis and synthesis. There was described their software and hardware equipment. Mathematical descriptions of models of regulation flow rate and position were found by the help of methods experimental identification. Simulation models were created in an environment MATLAB/Simulink. The mathematical descriptions were verified comparing simulation with measuring data. The controllers tunable parameters were proposed for each described method of synthesis. Their correctness were verified both simulation and directly on the models. The set of tasks for Control System Fundamentals were designed at the end.

## Obsah

Seznam použitých značek a zkratk.....	7
Úvod.....	8
1 Seznámení s laboratorními modely regulace polohy a průtoku .....	9
1.1 Laboratorní model regulace polohy .....	9
1.2 Laboratorní model regulace průtoku .....	11
1.3 Ovládací software.....	13
2 Určení matematického modelu laboratorních modelů .....	17
2.1 Určení matematického modelu laboratorního modelu regulace polohy .....	17
2.2 Určení matematického modelu laboratorního modelu regulace průtoku .....	20
3 Návrh konvenčních regulátorů a jejich ověření.....	28
3.1 Návrh konvenčních regulátorů .....	28
3.2 Ověření regulátorů pomocí číslicové simulace .....	33
3.3 Ověření navržených regulátorů na laboratorním modelu.....	41
4 Úlohy k samostatné práci studentů.....	44
5 Zhodnocení .....	46

**Seznam použitých značek a zkratek**

$G_s(s)$	přenos soustavy, L-přenos
$k_1$	zesílení přenosu
$k_p$	proporcionální složka regulátoru
$s$	komplexní proměnná
$t$	čas [s]
$T_1$	setrvačná časová konstanta [s]
$T_I$	integrační časová konstanta
$T_D$	derivační časová konstanta
$T_d$	dopravní zpoždění [s]
$u$	akční veličina
$u_\infty$	ustálená hodnota akční veličiny
$y_1$	hodnota přechodové charakteristiky v čase $t = 1\text{s}$
$y_\infty$	ustálená hodnota výstupu
$PID$	proporcionálně-integračně-derivační regulátor

## Úvod

Laboratorní modely a simulace technologických procesů ovlivňují rozvoj technických oborů. Modely představují nástroj pro zkoumání vlastností reálného objektu. Jednoduchá konstrukce, relativní bezpečnost a energetická nenáročnost umožňují zkoumání reálných problémů v laboratorním prostředí.

První část práce se zabývá softwarovou a hardwarovou vybaveností laboratorních modelů regulace polohy jezdce a průtoku kapaliny. Dále se určí chování a vlastnosti zkoumaných soustav na základě experimentální identifikace. Získáním a následným vyhodnocením naměřených dat se zjistí matematické popisy modelů. K ověření správnosti matematických popisů obou soustav dojde po vytvoření simulačních modelů v prostředí Matlab/Simulink a porovnáním simulace s naměřenými daty.

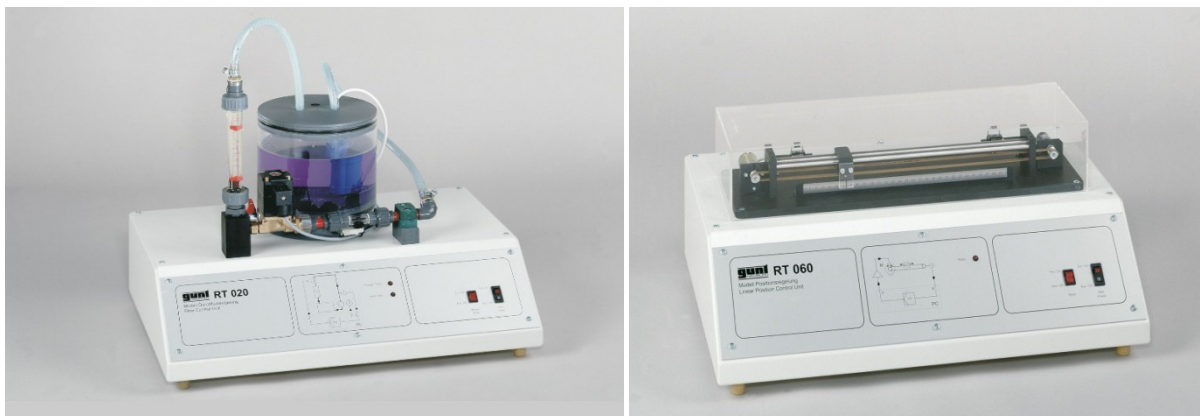
Syntéza je zaměřena na návrh regulátorů podle matematických popisů soustav, pomocí dostupných zpracovaných metod syntézy. Pomocí metod syntézy můžeme různými způsoby zjistit stavitelné parametry regulátorů a po jejich grafickém vyhodnocení určit ten nejvhodnější.

V poslední části jsou navrženy čtyři úlohy pro samostatnou práci studentů v předmětu Základy automatizace.



## 1 Seznámení s laboratorními modely regulace polohy a průtoku

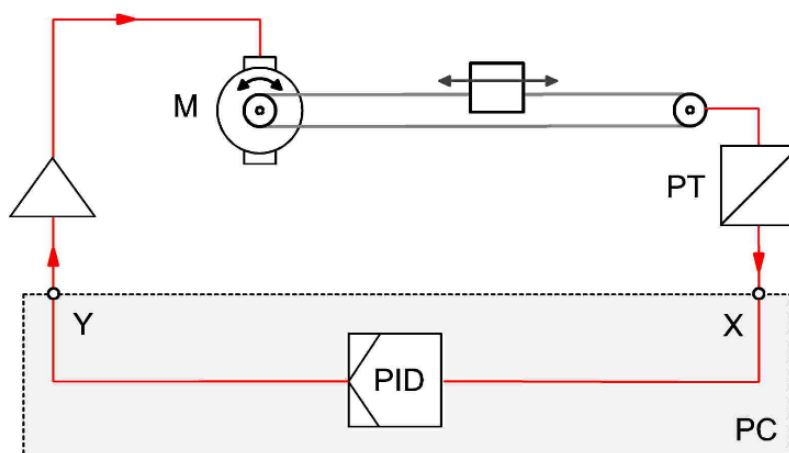
Laboratorní modely ovlivňují rozvoj technických oborů. Modely představují nástroj pro zkoumání vlastností reálného objektu. Jednoduchá konstrukce, relativní bezpečnost a energetická nenáročnost, umožňují zkoumání reálných problémů v laboratorním prostředí.



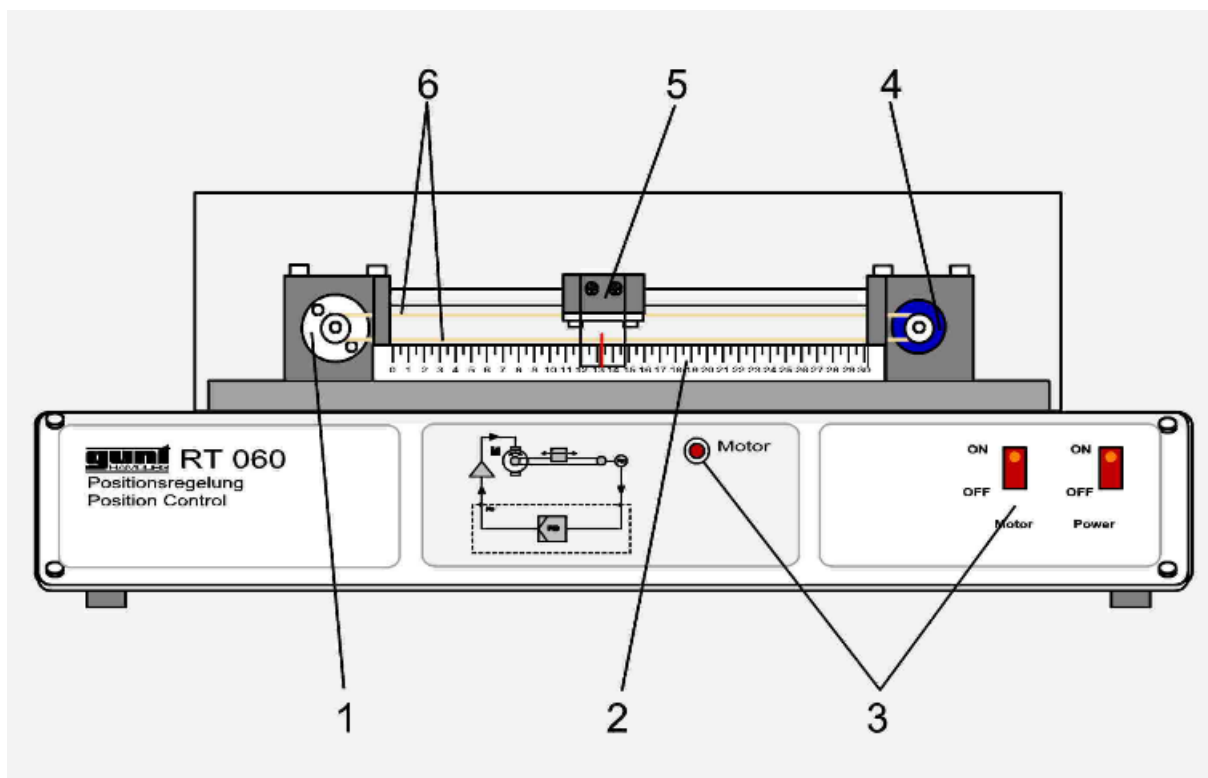
Obr. 1 – Laboratorní modely regulace průtoku a polohy

### 1.1 Laboratorní model regulace polohy

Laboratorní model představuje typický regulační obvod, jež je standardně rozšířen v praxi. Externě ovládaný elektrický motor vykonává funkci pohánějícího a pozičního zařízení na lineární ose. Absolutní pozice povozu je určena rotováním modulátoru, který v závislosti na otočení vrací odpovídající napěťový signál. Model je doplněn samostatným externím ovladačem pro vytvoření kompletního regulačního obvodu.



Obr. 2 - Funkční schéma modelu



Obr. 3 - Prostorové uspořádání

## Funkce

Model komunikuje s externím zařízením (PC) pomocí portu USB. Jako komunikační rozhraní slouží software *RT 010 - Základy techniky řízení*.

Na Obr. 3 elektrický motor (1) se sekundárním ozubeným kolem je akčním členem a hýbe jezdcem (5) podél vodítka pomocí ozubeného pásu (6). Motor může jezdit v obou směrech stejnými rychlostmi. Motor může být oddělen nebo vypnut pomocí vypínače motoru (3). Signalizace motoru indikuje, kdy je motor zapnut.

Rotační modulátor (4) reprezentuje měřicí zařízení v systému. Úhel jeho natočení koresponduje s pozicí jezdce. Signál pro absolutní pozici jezdce je tak dostupný ve formě elektrického napětí.

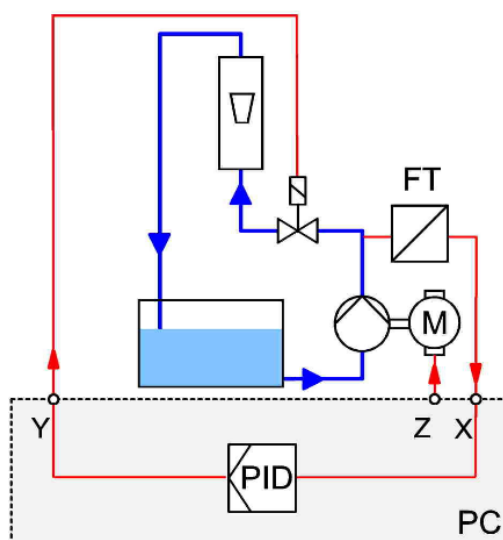
Pozice jezdce je zobrazena na lineární stupnici (2) pomocí ukazovátka upevněném na jezdci. Dvě koncové pozice jezdce (0 m a 0,3 m) jsou monitorovány odděleným přepínačem na jezdci. Motor se automaticky vypne, jestliže jezdec dojede na jeden ze dvou konců.

### Technická data

Napájení:	230 V, ~50 Hz
Typ motoru:	Stejnoseměrný el. motor
Převod:	1 : 10
Trasa povozu:	0 - 300 mm
Rychlost povozu:	max. 45 mm/s
Prahové napětí:	(y) = min. 15 % (~ 0,75 V)
Ozubený pás DIN 7721	
Dílek:	2,5 mm
Délka:	915 mm
Šíře:	6 mm
Senzor polohy:	
Typ:	Potenciometr
Výstupní signál:	0 - 5 V koresponduje 0 - 300 mm
PC komunikace:	USB

## 1.2 Laboratorní model regulace průtoku

Model regulace průtoku představuje klasický regulační obvod, který je standardně rozšířen v praxi. Smyčka je tvořena systémem trubek, přes které proudí voda z nádrže. Toto se ovládá externím ovladačem. Proud je zaznamenáván použitím elektrického proudového senzoru na turbínovém principu. Okruh také obsahuje proudový metr s plovákem pro vizuální kontrolu rychlosti průtoku kapaliny. Model je doplněn samostatným externím ovladačem, aby byl regulační obvod kompletní.



Obr. 4 – Funkční schéma modelu



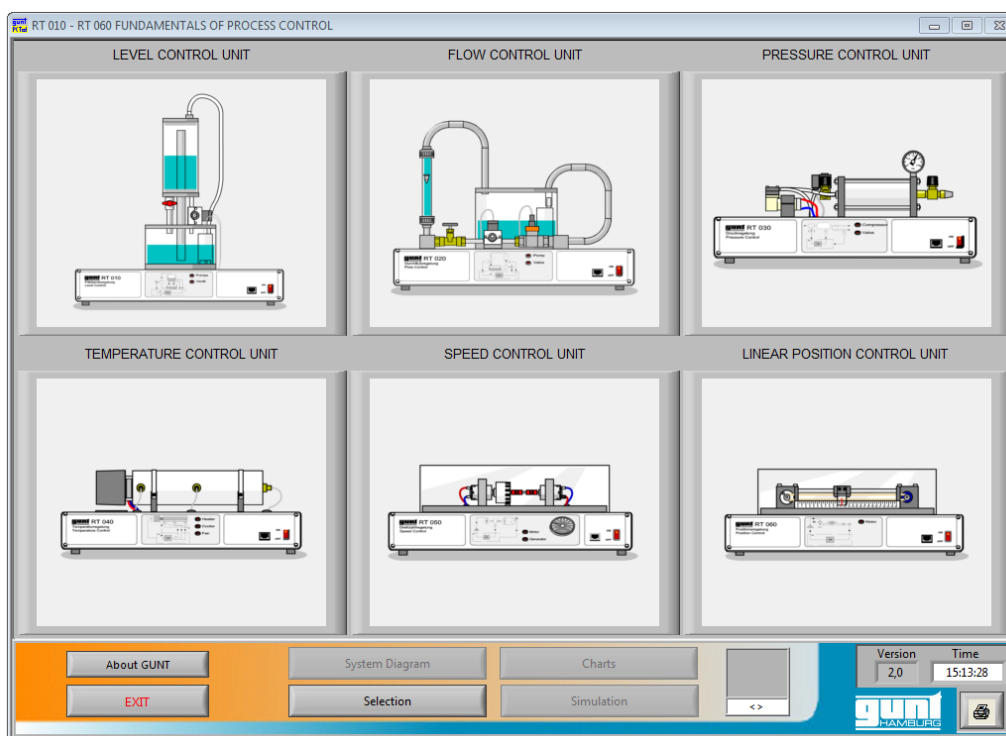
## Technická data

Napájení:	230 V, ~50 Hz
Proudové míry:	
Type: Turbína	30 - 300
Výstupní signál, puls	6900
Type: Plovák	20 – 260
Pumpa	max. 480
	max. 0,5 bar
	12 V DC
Ventil:	0 ... 24 V
kvs	700
Vodní nádrž:	~ 3,6 ltr

### 1.3 Ovládací software

*RT 010 – Základy techniky řízení* poskytuje moderní zaznamenávající a měřicí program s rozmanitými funkcemi, který běží pod systémem Windows. Komunikace s modelem probíhá přes rozhraní USB.

Pro každý model je dostupný individuální program. Ten se volí hned po spuštění na úvodní obrazovce, viz. Obr. 6.

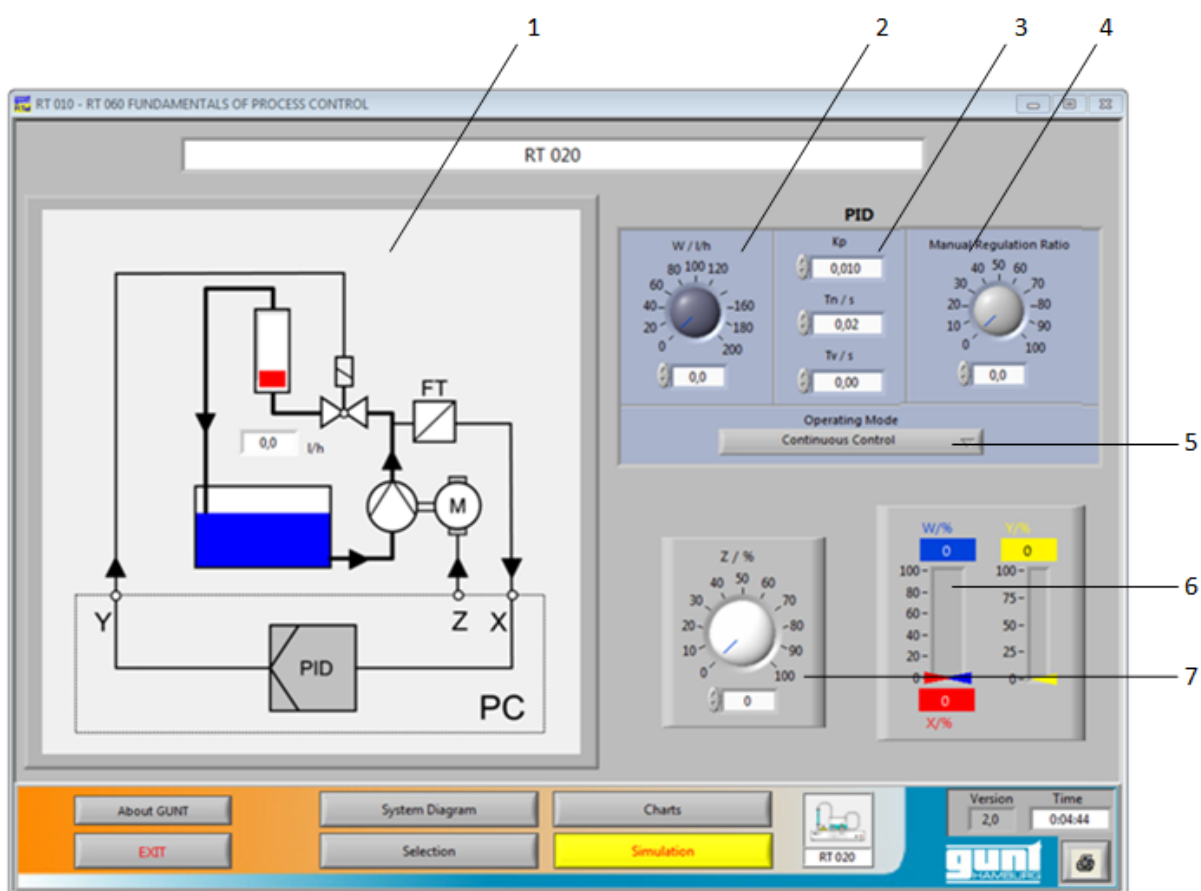


Obr. 6 – Okno pro volbu laboratorního modelu - Selection

Spodní část obrazovky také obsahuje nástrojový řádek s doplňkovými tlačítky a informační pole, které jsou dostupné v každém menu.

### Okno - System Diagram

V levé části okna na Obr. 7 je zobrazeno schéma (1), které ukazuje pohled na zvolený regulační obvod. V nabídce (5) může být zvoleno manuální ovládání nebo regulované řízení. Kruhová stupnice (4) je určena pro manuální ovládání, políčka (3) pro zadání parametrů  $k_p$ ,  $T_I$  a  $T_D$  PID regulátoru a kruhová stupnice (2) pro zadání požadované hodnoty. Vpravo dole je umístěno pole (6) poskytující aktuální hodnoty řízení a stupnice (7) pro zadání velikosti poruchy u některých modelů.

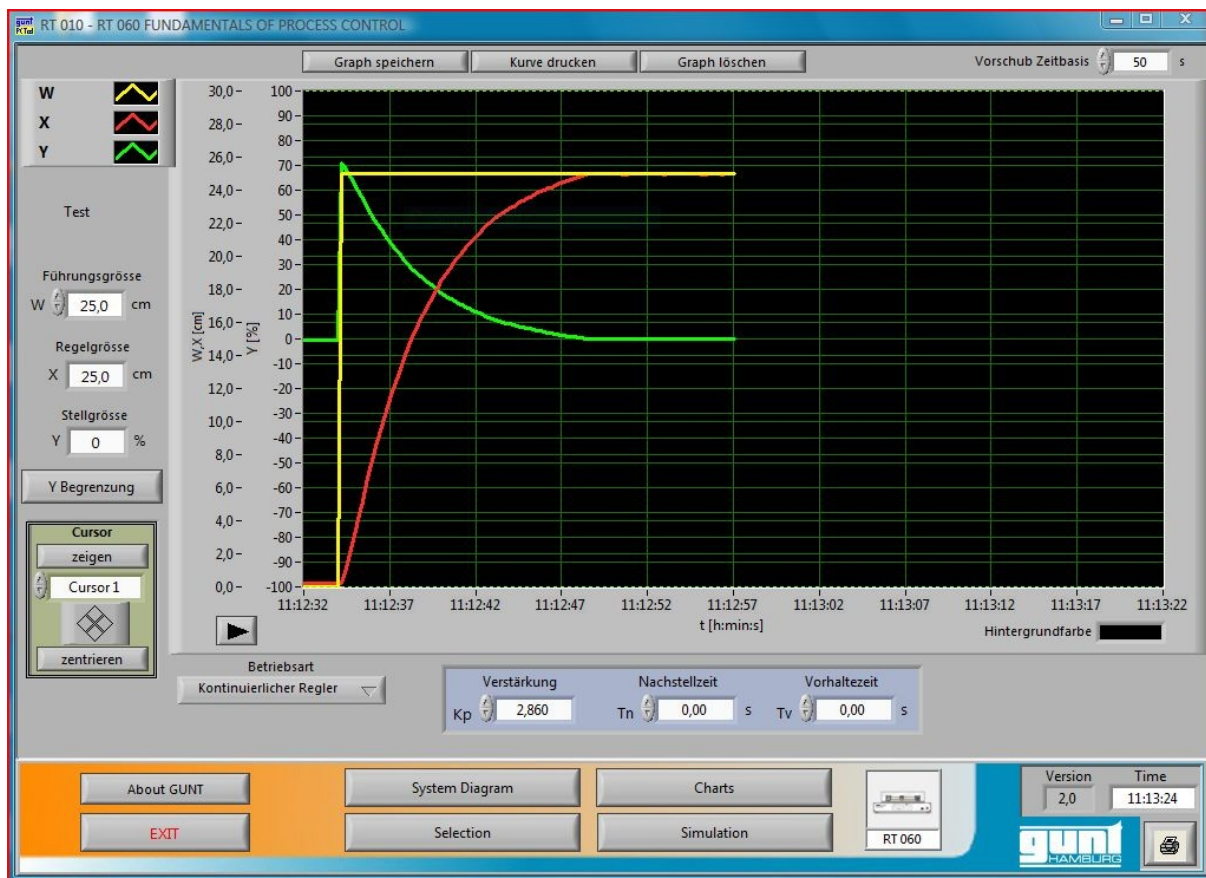


Obr. 7 - Okno – System Diagram

### Okno – Charts

Obr. 8 zobrazuje okno pro zobrazení průběhu signálu v průběhu času. Všechny řídicí funkce jsou dostupné i v tomto okně a reagují stejně jako v okně system diagram. Dá se tedy měnit typ ovládání a velikosti vstupních parametrů. Dále pak nastavení délky časové oblasti grafu. Ta se mění v pravé horní části obrazovky. Výběrem možností nahoře se získávají

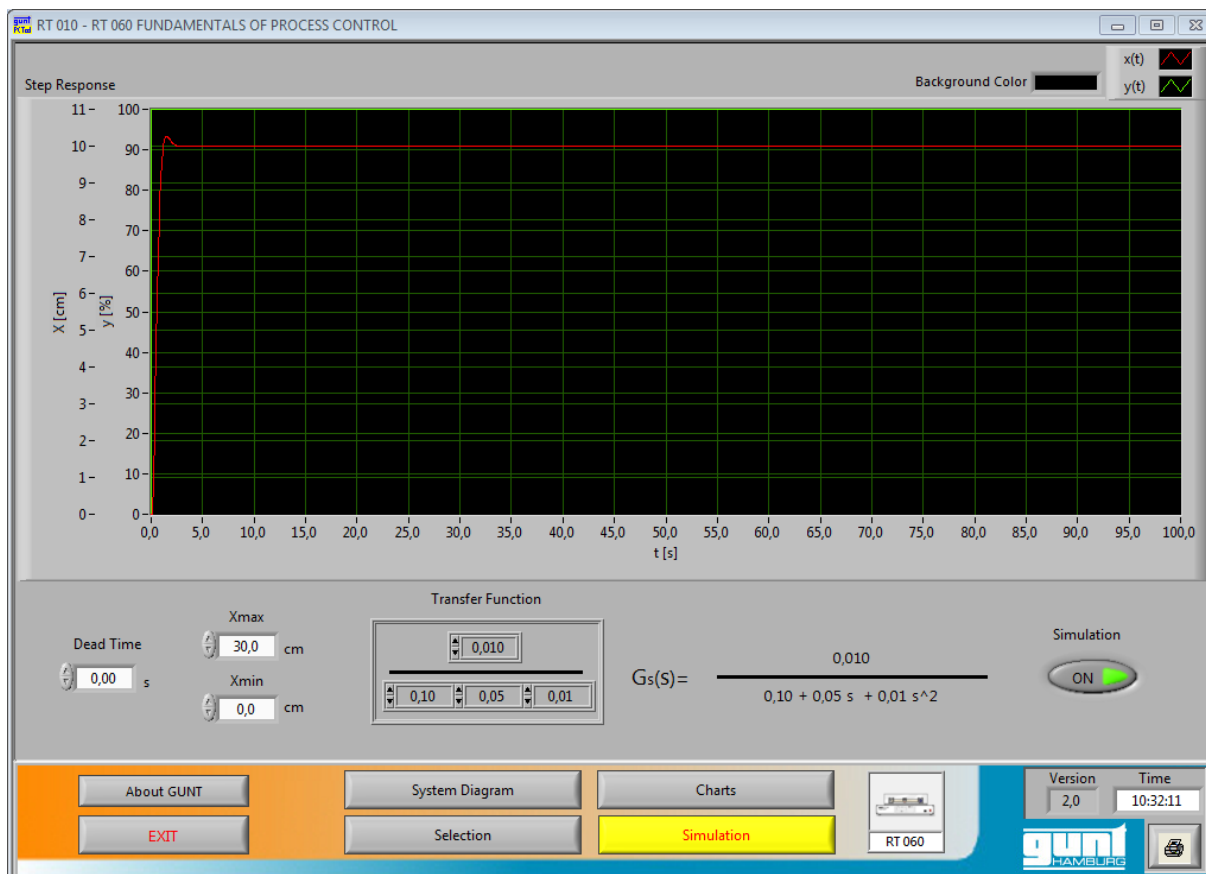
naměřená data a ukládají do formátu, který se dá otevřít v běžných textových nástrojích systému Windows. Průběh signálu může být v jakýkoliv čas pozastaven nebo vymazán.



Obr. 8 - Okno – Charts

## Okno - Simulation

Zvolením okna Simulation (Obr. 9) je zobrazena obrazovka pro simulaci obrazového přenosu. Parametry přenosu  $k_I$ ,  $T_I$  a  $T_2$ , se zadávají do pole na Obr. 10. Hodnoty mohou být volně měněny v jakýkoliv čas.



Obr. 9 – Okno – Simulation

Obr. 10 – Tabulka pro zadání jednotlivých parametrů obrazového přenosu

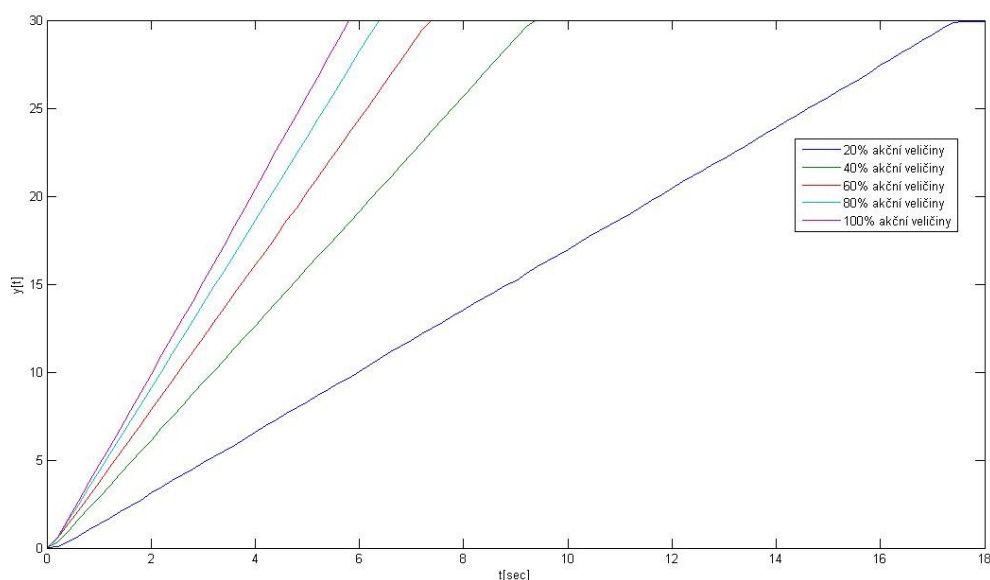


## 2 Určení matematického modelu laboratorních modelů

Matematické modely jednotlivých laboratorních modelů byly určeny pomocí experimentální identifikace. Byly naměřeny přechodové charakteristiky a matematický model byl získán jejich aproximací.

### 2.1 Určení matematického modelu laboratorního modelu regulace polohy

Měření přechodové charakteristiky bylo provedeno pro 5 hodnot akční veličiny, a to pro 20%, 40%, 60%, 80% a 100% maximální hodnoty vstupní veličiny. Toto měření bylo opakováno pětkrát pro každou hodnotu pro přesnější vyhodnocení přechodových charakteristik. Vzorkovací perioda měření je 0,2 sekundy.



**Obr. 11 - Přechodové charakteristiky, model regulace polohy**

Z přechodových charakteristik, viz. Obr. 11, je vidět, že se jedná o ideální integrační soustavu. Chování systému lze popsat přenosem ve tvaru

$$G_s(s) = \frac{k_1}{s} \quad (1)$$

kde je  $G_s(s)$  – obrazový přenos,  $k_1$  – zesílení soustavy,  $s$  – komplexní proměnná.

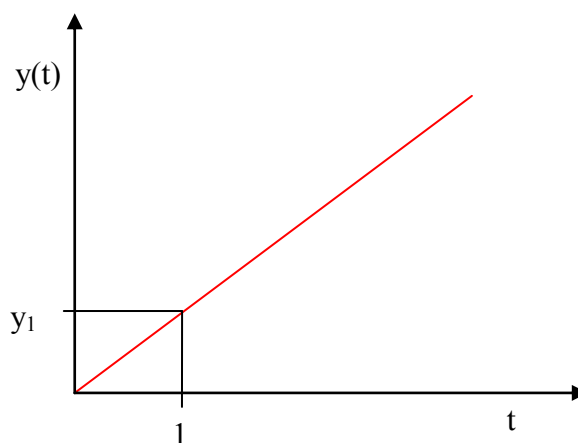
Konstantu  $k_1$  určíme poměrem odečtené hodnoty  $y_1$  z přechodové charakteristiky v čase  $t = 1s$  a ustálené hodnoty vstupní veličiny  $u_\infty$ .

$$k_1 = \frac{y_1}{u_\infty} \quad (2)$$

kde je  $y_1$  – hodnota přechodové charakteristiky v čase  $t = 1$ ,  $u_\infty$  - ustálená hodnota akční veličiny.

### Příklad výpočtu

Příklad výpočtu je proveden pro 20% maximální vstupní veličiny.



Obr. 12 - Grafické znázornění odečtení hodnoty  $y_1$

Pro čas  $t = 1s$  byla z přechodové charakteristiky odečtena hodnota  $y_1 = 1,38$ .

$$k_1 = \frac{y_1}{u_\infty} = \frac{1,62}{20} = 0,08 \quad (3)$$

Dosazením konstanty  $k_1$ , byl získán výsledný přenos.

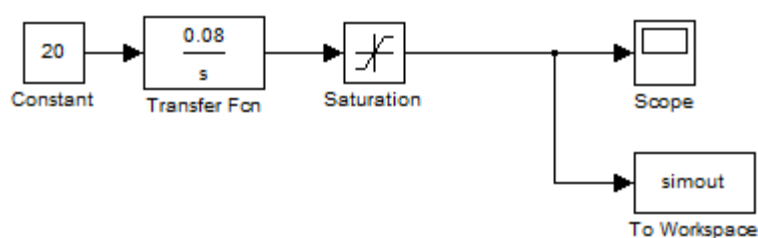
$$G_s(s) = \frac{0,07}{s} \quad (4)$$

Tab. 1 – Jednotlivé přenosy soustav pro hodnoty vstupní veličiny

Vstupní veličina	Přenos soustavy
20%	$G_s(s) = \frac{0,08}{s}$
40%	$G_s(s) = \frac{0,08}{s}$
60%	$G_s(s) = \frac{0,07}{s}$
80%	$G_s(s) = \frac{0,06}{s}$
100%	$G_s(s) = \frac{0,05}{s}$

### Simulační model

Simulační model byl vytvořen v prostředí programu Matlab/Simulink. Simulační model byl sestaven vždy pro ověření jednoho matematického modelu. Bylo simulováno všech pět matematických modelů a hodnoty byly porovnány s naměřenými daty.



Obr. 13 - Simulační model pro 20% akční veličiny

### Popis bloků simulačního modelu

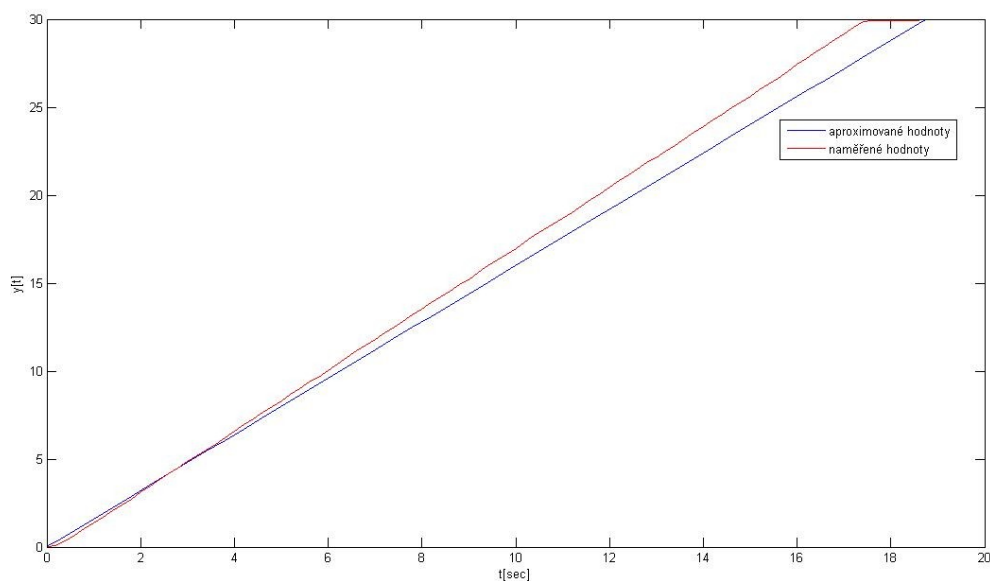
**Constant** – Blok pro vložení velikosti akční veličiny.

**Transfer Fcn** – Blok pro vložení obrazového přenosu soustavy.

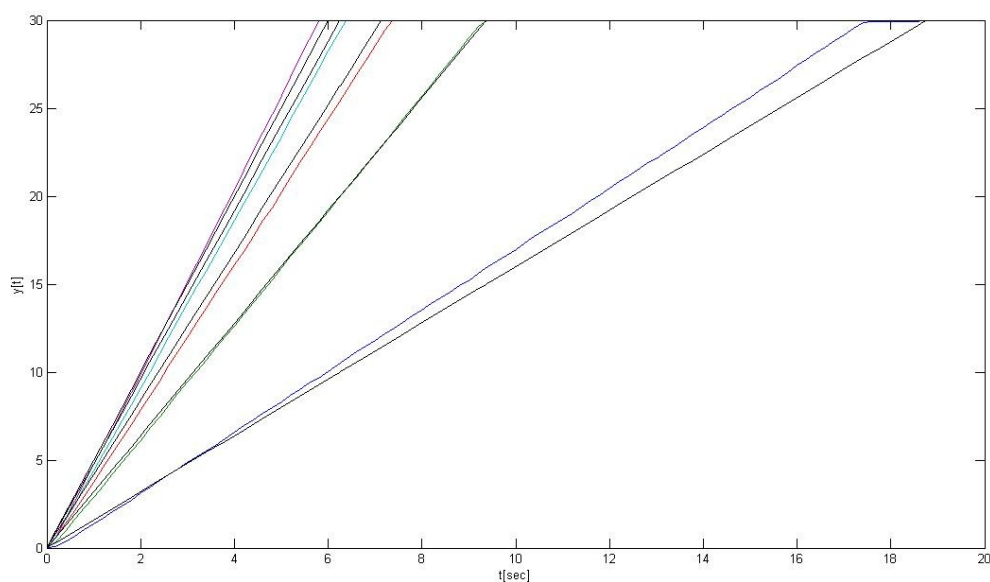
**Saturation** – Nasycení.

**Scope** – Grafický výstup.

**To Workspace** – Výstup hodnot do prostředí Matlabu.



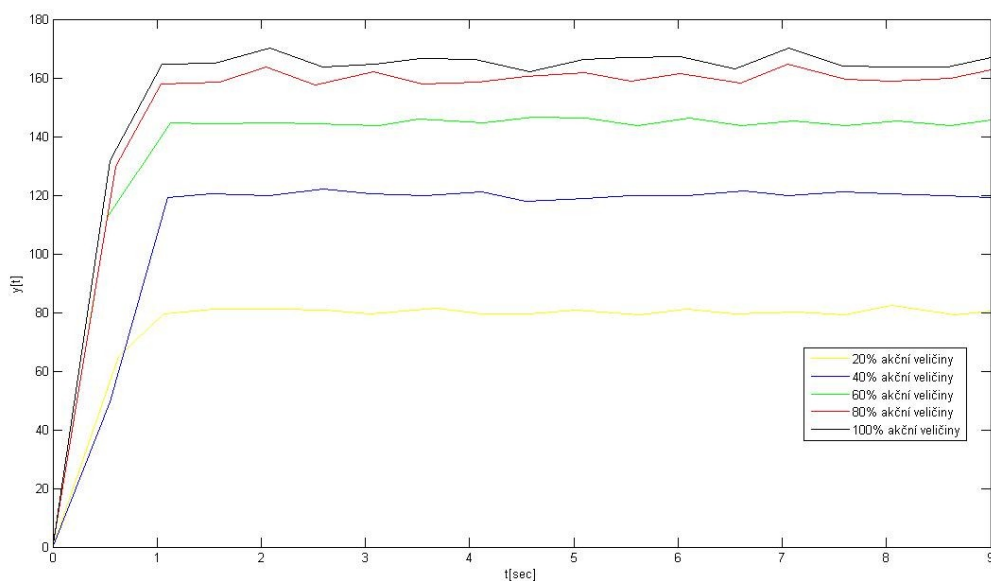
**Obr. 14 - Průběh pro 20% akční veličiny a její aproximace**



**Obr. 15 – Porovnání naměřených dat se simulací pro všechny průběhy akční veličiny (aproximace – černě, naměřená data – barevně)**

## 2.2 Určení matematického modelu laboratorního modelu regulace průtoku

Měření přechodové charakteristiky bylo provedeno pro 5 hodnot akční veličiny, a to pro 20%, 40%, 60%, 80% a 100% maximální vstupní veličiny. Toto měření bylo opakováno pětkrát pro každou hodnotu pro přesnější vyhodnocení přechodových charakteristik. Vzorkovací perioda modelu regulace tlaku je plovoucí a pohybuje se v rozmezí od 0,4 sekundy do 0,7 sekundy.



**Obr. 16 - Přechodové charakteristiky, model regulace průtoku**

### Aproximace proporcionální soustavou se setrvačností 1. řádu

Pokud má odezva systému podobný průběh odezvy proporcionálního členu se setrvačností 1. řádu, můžeme systém popsat přenosem. [NOSKIEVIC, P. 1999]

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} \quad (5)$$

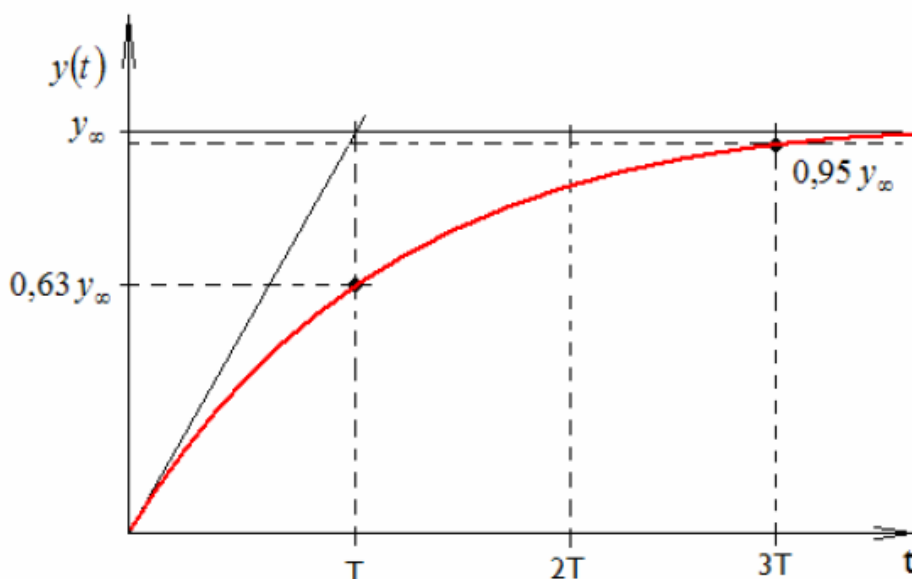
Zesílení  $k_1$  se určí z poměru ustálených hodnot výstupní a vstupní veličiny.

$$k_1 = \frac{y_\infty}{u_\infty} \quad (6)$$

$y_\infty$  - ustálená hodnota výstupu

$u_\infty$  - velikost vstupní veličiny

Časovou konstantu  $T_1$  stanovíme z hodnoty přechodové charakteristiky  $0,63y_\infty$  nebo  $0,95y_\infty$ .



Obr. 17 - Grafické znázornění odečtení hodnoty

### Příklad výpočtu

Příklad výpočtu je proveden pro 20% maximální vstupní veličiny. Pro 20% vstupní veličiny se soustava ustálí na hodnotě  $y_{\infty} = 80,27$ .

$$k_1 = \frac{y_{\infty}}{u_{\infty}} = \frac{80,27}{20} = 4,01 \quad (7)$$

Časová konstanta  $T_l$  byla odečtena z přechodové charakteristiky. Pro  $0,63y_{\infty}$  je  $T_l = 0,49$ .

Dosazením byl získán výsledný přenos.

$$G_s(s) = \frac{4,01}{0,49s+1} \quad (8)$$

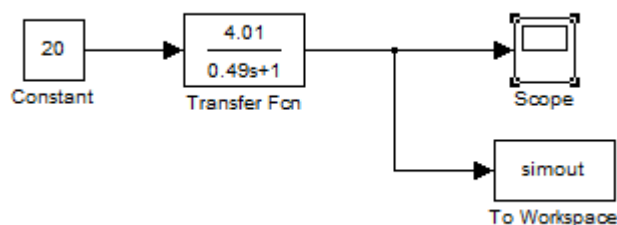
Tab. 2 - Jednotlivé přenosy soustav pro hodnoty vstupní veličiny

Vstupní veličina	Přenos soustavy
20%	$G_s(s) = \frac{4,01}{0,49s+1}$
40%	$G_s(s) = \frac{3}{0,46s+1}$
60%	$G_s(s) = \frac{2,42}{0,42s+1}$

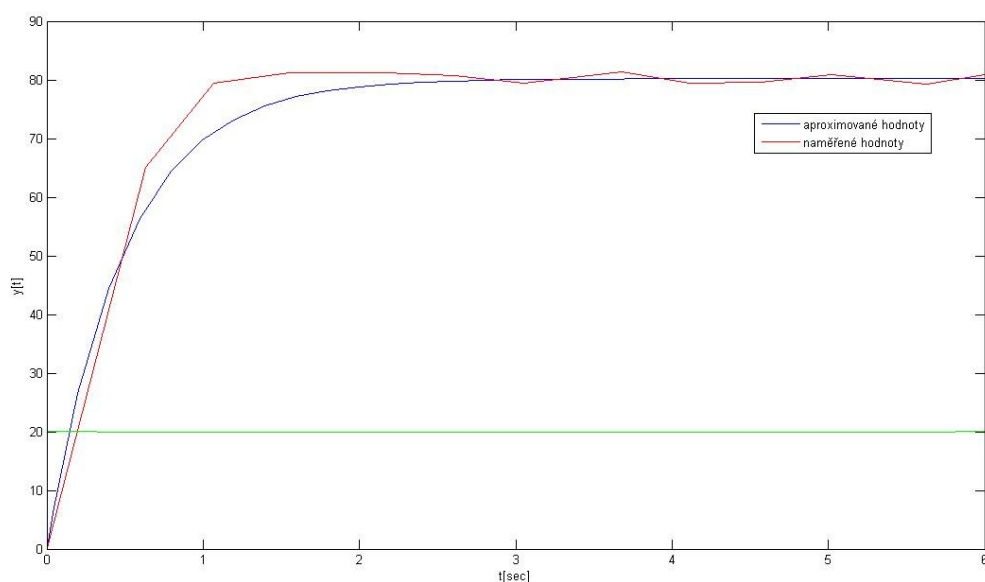
Vstupní veličina	Přenos soustavy
80%	$G_s(s) = \frac{2}{0,47s + 1}$
100%	$G_s(s) = \frac{1,66}{0,44s + 1}$

### Simulační model

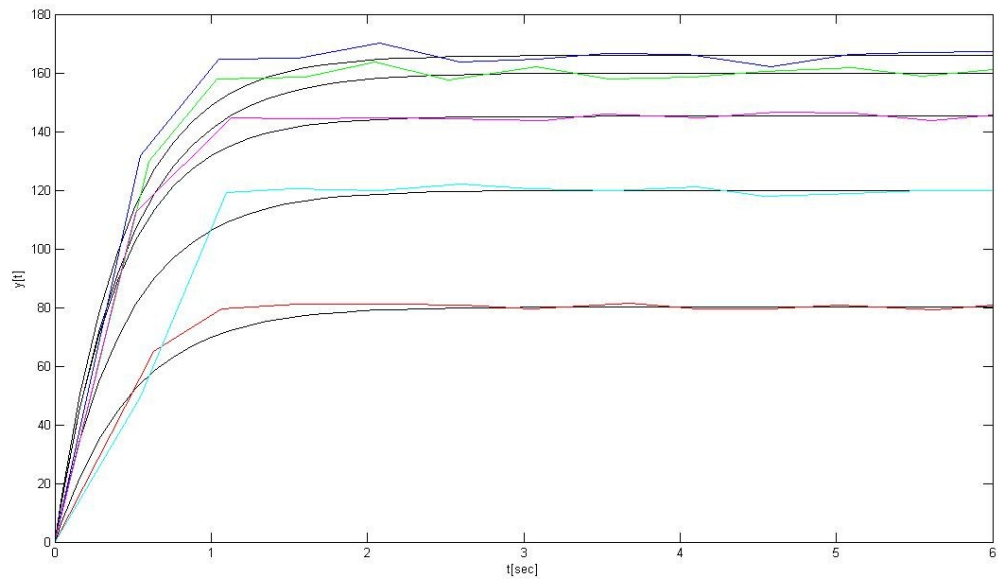
Simulační model byl vytvořen v prostředí programu Matlab/Simulink. Simulační model byl sestaven vždy pro ověření jednoho matematického modelu. Bylo simulováno všech pět matematických modelů a srovnání s naměřenými daty bylo graficky vyhodnoceno.



Obr. 18 - Simulační model pro 20% akční veličiny



Obr. 19 - Průběh pro 20% akční veličiny a její aproximace



**Obr. 20 - Porovnání naměřených dat se simulací pro všechny průběhy akční veličiny (aproximace – černě, naměřená data – barevně)**

### Aproximace pomocí dvou bodů odezvy

Náhradní přenos bude mít tvar.

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s} \quad (9)$$

Stanovíme poměrné hodnoty ustáleného stavu  $y_{0,7} = 0,7y_\infty$ ,  $y_{0,33} = 0,33y_\infty$  a jim odpovídající časy  $t_{0,7}$  a  $t_{0,33}$ .

Konstanty  $T_l$  a  $T_d$  určíme podle vztahů [Vítečková, 1998]

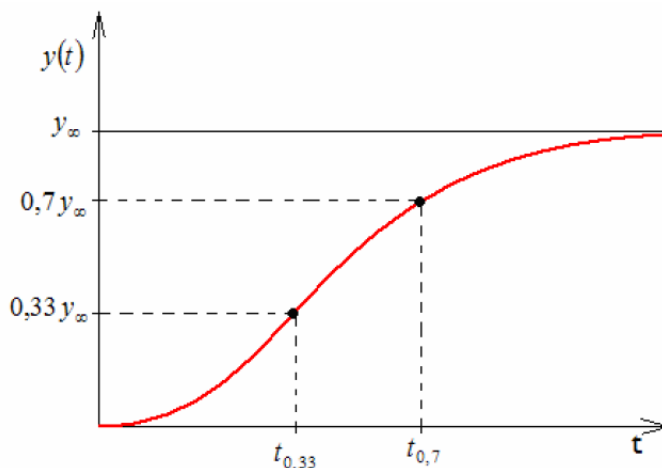
$$T_l = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) \quad (10)$$

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} \quad (11)$$

Zesílení  $k_l$  se určí z poměru ustálených výstupních a vstupních hodnot.

$$k_1 = \frac{y_\infty}{u_\infty} \quad (12)$$





Obr. 21 Grafické znázornění odečtení hodnot

**Příklad výpočtu**

Příklad výpočtu je proveden pro 20% maximální vstupní veličiny. Z přechodové charakteristiky byly odečteny hodnoty  $t_{0,7}$  a  $t_{0,33}$ .

$$t_{0,7} = 0,54$$

$$t_{0,33} = 0,26$$

Výpočet konstant  $T_I$  a  $T_d$ .

$$T_I = 1,245 \cdot (t_{0,7} - t_{0,33}) = 1,245 \cdot (0,54 - 0,26) = 0,35 \quad (13)$$

$$T_d = 1,498 \cdot t_{0,33} - 0,498 \cdot t_{0,7} = 1,498 \cdot 0,26 - 0,498 \cdot 0,54 = 0,12 \quad (14)$$

Pro 20% vstupní veličiny se soustava ustálí na hodnotě  $y_\infty = 80,27$ .

$$k_1 = \frac{y_\infty}{u_\infty} = \frac{80,27}{20} = 4,01 \quad (15)$$

Dosazením byl získán výsledný přenos.

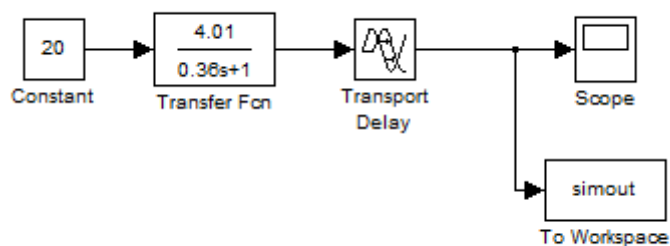
$$G_s(s) = \frac{4,01}{0,36s+1} e^{-0,11s} \quad (16)$$

Tab. 3 - Jednotlivé přenosy soustav pro hodnoty vstupní veličiny

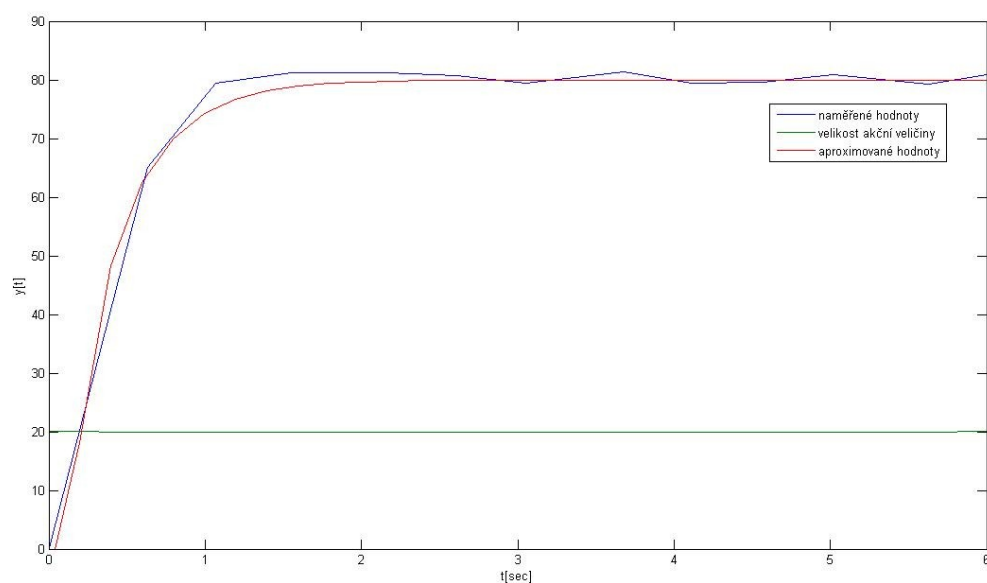
Vstupní veličina	Přenos soustavy
20%	$G_s(s) = \frac{4,01}{0,36s + 1} e^{-0,1s}$
40%	$G_s(s) = \frac{3}{0,35s + 1} e^{-0,1s}$
60%	$G_s(s) = \frac{2,42}{0,31s + 1} e^{-0,1s}$
80%	$G_s(s) = \frac{2}{0,34s + 1} e^{-0,1s}$
100%	$G_s(s) = \frac{1,66}{0,32s + 1} e^{-0,1s}$

### Simulační model

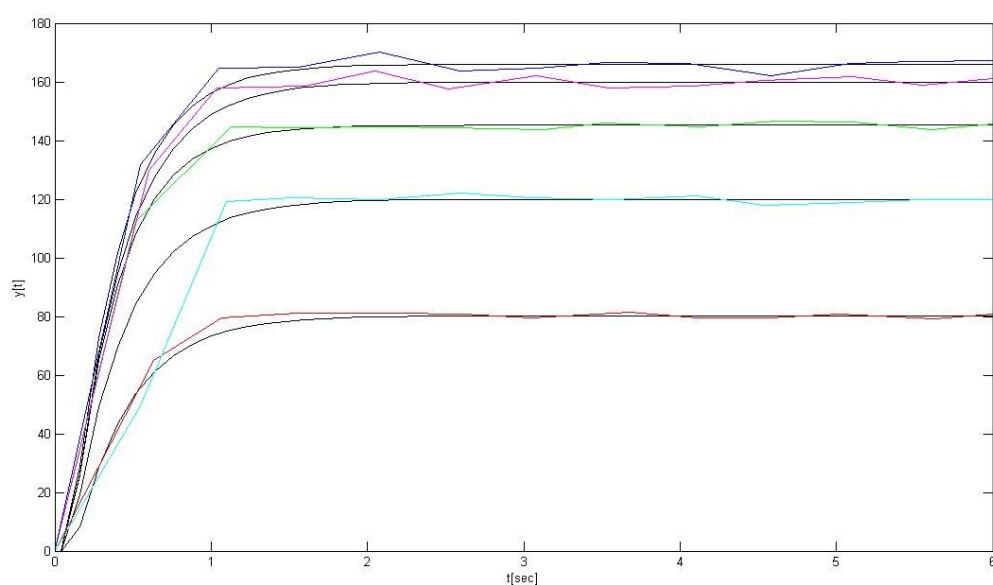
Simulační model byl vytvořen v prostředí programu Matlab/Simulink. Simulační model byl sestaven vždy pro ověření jednoho matematického modelu. Bylo simulováno všech pět matematických modelů a srovnání s naměřenými daty bylo graficky vyhodnoceno.



Obr. 22 - Simulační model pro 20% akční veličiny



**Obr. 23 - Průběh pro 20% akční veličiny a její aproximace**



**Obr. 24 - Porovnání naměřených dat se simulací pro všechny průběhy akční veličiny (aproximace – černě, naměřená data – barevně)**

### 3 Návrh konvenčních regulátorů a jejich ověření

Konvenční regulátory jsou složeny ze tří složek, a to proporcionální, derivační a integrační. Jejich kombinací získáme požadovaný typ regulátoru (P, I, PI, PD, PID). Typ regulátoru a jeho stavitelné parametry byly zjištěny pomocí metod syntézy. Dále byla ověřena správnost seřízení porovnáním číslicové simulace v programu Matlab/Simulink s naměřenými daty.

#### 3.1 Návrh konvenčních regulátorů

Pro návrh regulátorů byly použity celkem 4 metody syntézy a to:

- Metoda požadovaného modelu
- Metoda optimálního modulu
- Metoda násobného dominantního pólu
- Metoda SIMC

#### Laboratorní model regulace polohy

Pro přenos ve tvaru  $G_s(s) = \frac{k_1}{s}$  byla zvolena Metoda požadovaného modelu pro soustavy bez dopravního zpoždění a navržen P regulátor.

#### Příklad výpočtu

Regulátor byl navržen pro přenos

$$G_s(s) = \frac{0,7}{s} \quad (17)$$

Proporcionální složka  $k_p^*$  P regulátoru se určí ze vztahu

$$k_p^* = \frac{2}{k_1 2T_w} \quad (18)$$

kde je  $k_p^*$  - optimální proporcionální složka regulátoru,  $T_w$  – časová konstanta.

Časová konstanta  $T_w$  se volí s ohledem na omezení akční veličiny a maximální nastavitelnou hodnotu zesílení regulátoru. Byla zvolena hodnota  $T_w = 5$ .

$$k_p^* = \frac{2}{k_1 2T_w} = \frac{2}{0,7 \cdot 2 \cdot 5} = 2,86 \quad (19)$$

Přenos výsledného regulátoru je pak

$$G_R(s) = 1,43 \quad (20)$$

### Laboratorní model regulace průtoku

Pro získaný přenos bez dopravního zpoždění byly použity 2 metody syntézy, a to:

- Metoda optimálního modulu
- Metoda násobného dominantního pólu

Pro přenos s dopravním zpožděním byly použity 3 metody syntézy, a to:

- Metoda požadovaného modelu
- Metoda SIMC
- Metoda násobného dominantního pólu

### Metoda optimálního modulu

Vychází z požadavku na přenos řízení, resp. modulu kmitočtového přenosu řízení. Má-li přenos regulované soustavy  $G_s(s)$  některý z tabulkových tvarů, můžeme pro daný tvar použít uvedený regulátor a určit jeho stavitelné parametry.

Z tabulky 5.11. [Vítečková & Víteček, 2008] byl zjištěno, že pro přenos ve tvaru  $G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1}$  bude vhodný  $I$  regulátor.

### Příklad výpočtu

Regulátor byl navržen pro přenos

$$G_s(s) = \frac{2,62}{0,46s + 1} \quad (21)$$

Integrační složka  $T_I^*$   $I$  regulátoru se určí ze vztahu

$$T_I^* = 2k_1(T_1 - 0,5T) = 2 \cdot 2,62 \cdot 0,46 = 2,41 \quad (22)$$

kde je  $T_I^*$  - optimální integrační složka regulátoru,  $T$  - vzorkovací perioda číslicového regulátoru (v tomto případě se jedná o analogový regulátor, a proto  $T = 0$ ).

Přenos výsledného regulátoru je pak

$$G_R(s) = \frac{1}{2,41s} \quad (23)$$

### Metoda násobného dominantního pólu

Protože přenos má tvar  $G_s(s) = \frac{k_1}{(T_1s+1)^i}$ , je možno podle tabulky 5.7. [Vítečková & Víteček, 2008] navrhnout  $I$  regulátor.

### Příklad výpočtu

Regulátor byl navržen pro přenos

$$G_s(s) = \frac{2,62}{0,46s+1} \quad (24)$$

Integrační složka  $T_I^*$   $I$  regulátoru se určí ze vztahu

$$T_I^* = k_1 T_i (i + 1) \left(\frac{i+1}{i}\right)^i = 2,62 \cdot 0,46 \cdot (1 + 1) \cdot \left(\frac{1+1}{1}\right)^1 = 4,82 \quad (25)$$

kde je  $i$  – řád mocniny ve jmenovateli přenosu.

Přenos výsledného regulátoru je pak

$$G_R(s) = \frac{1}{4,82s} \quad (26)$$

### Metoda požadovaného modelu

Metoda využívá kompenzaci časových konstant, zajišťuje stupeň astatismu regulačního obvodu  $q = 1$  (tj. nulové trvalé regulační odchylky). Umožňuje dosáhnout požadovaného relativního překmitu  $\kappa$  v rozmezí 0 až 50%.

Podle tabulky 5.14. [Vítečková & Víteček, 2008] byl pro přenos  $G_s(s) = \frac{k_1}{T_1s+1} e^{-T_d s}$  navržen  $PI$  regulator.

### Příklad výpočtu

Regulátor byl navržen pro přenos

$$G_s(s) = \frac{2,62}{0,34s+1} e^{-0,1s} \quad (27)$$

Proporcionální složka  $k_p^*$  a integrační složka  $T_I^*$   $PI$  regulátoru se určí ze vztahů

$$T_I^* = T_1 - \frac{T}{2} = 0,34 - \frac{0}{2} = 0,34 \quad (28)$$

$$k_p^* = \frac{T_I^*}{(\alpha T + \beta T_d)k_1} = \frac{0,34}{(1,282 \cdot 0 + 2,718 \cdot 0,1) \cdot 2,62} = 0,48 \quad (29)$$

kde je  $T_d$  – dopravní zpoždění,  $\alpha, \beta$  - koeficienty pro překmit  $\kappa = 0\%$

Přenos výsledného regulátoru je pak

$$G_R(s) = 0,48 \left( 1 + \frac{1}{0,34s} \right) \quad (30)$$

### Metoda SIMC

Podle tabulky 5.16. [Vítečková & Víteček, 2008] byl pro přenos

$$G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s} \text{ navržen } PI \text{ regulator.}$$

### Příklad výpočtu

Regulátor byl navržen pro přenos

$$G_s(s) = \frac{2,62}{0,34s + 1} e^{-0,1s} \quad (31)$$

Proporcionální složka  $k_p^*$  a integrační složka  $T_I^*$   $PI$  regulátoru se určí ze vztahů

$$T_I^* = T_1 = 0,34 \quad (32)$$

$$K_p^* = \frac{T_1}{2k_1 T_d} = \frac{0,34}{2 \cdot 2,62 \cdot 0,1} = 0,65 \quad (33)$$

Přenos výsledného regulátoru je pak

$$G_R(s) = 0,65 \left( 1 + \frac{1}{0,34s} \right) \quad (34)$$

### Metoda násobného dominantního pólu

Podle tabulky 5.8. [Vítečková & Víteček, 2008] byl pro přenos  $G_s(s) = \frac{k_1}{T_1 s + 1} e^{-T_d s}$  navržen  $PI$  regulator.

### Příklad výpočtu

Regulátor byl navržen pro přenos

$$G_s(s) = \frac{2,62}{0,34s+1} e^{-0,1s} \quad (35)$$

Proporcionální složka  $k_p^*$  a integrační složka  $T_I^*$   $PI$  regulátoru se určí ze vztahů

$$s_3^* = -\frac{2}{T_d} - \frac{1}{2T_1} + \sqrt{\frac{2}{T_d^2} + \frac{1}{4T_1^2}} = -\frac{2}{0,1} - \frac{1}{2 \cdot 0,34} + \sqrt{\frac{2}{0,1^2} + \frac{1}{4 \cdot 0,34^2}} = -7,25 \quad (36)$$

$$k_p^* = -\frac{1}{k_1} [T_d T_1 s_3^{*2} + (2T_1 + T_d)s_3^* + 1] e^{T_d s_3^*} \quad (37)$$

$$k_p^* = -\frac{1}{2,62} [0,1 \cdot 0,34 \cdot (-7,25^2) + (2 \cdot 0,34 + 0,1) \cdot (-7,25) + 1] \cdot (-7,25)^{-7,25 \cdot 0,1}$$

$$k_p^* = 0,53$$

$$T_I^* = -\frac{T_d T_1 s_3^{*2} + (2T_1 + T_d)s_3^* + 1}{(T_d T_1 s_3^* + T_1 + T_d)s_3^{*2}} \quad (38)$$

$$T_I^* = \frac{0,1 \cdot 0,34 \cdot (-7,25^2) + (2 \cdot 0,34 + 0,1) \cdot (-7,25) + 1}{(0,1 \cdot 0,34 \cdot (-7,25) + 0,34 + 0,1) \cdot (-7,25)^2}$$

$$T_I^* = 0,28$$

Přenos výsledného regulátoru je pak

$$G_R(s) = 0,53 \left( 1 + \frac{1}{0,28s} \right) \quad (39)$$

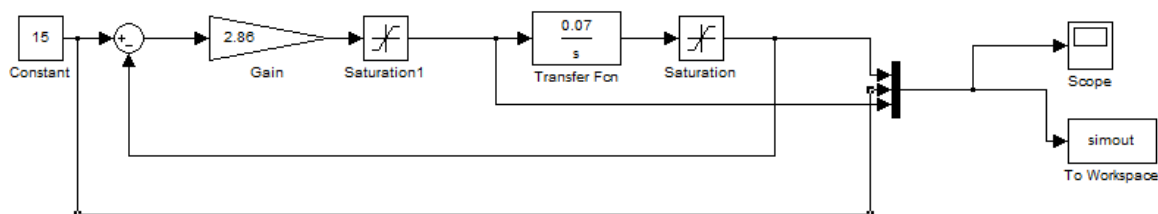


### 3.2 Ověření regulátorů pomocí číslicové simulace

Byl vytvořen simulační model pro ověření nastavení regulátorů. Model byl sestaven pro každou získanou regulovanou soustavu a pro všechny použité metody syntézy.

#### Model regulace polohy

Simulace byla provedena pro přenos  $G_s(s) = \frac{0,07}{s}$ , hodnotu žádané veličiny  $w = 15$  a hodnotu regulátoru  $k_p^* = 2,86$ .

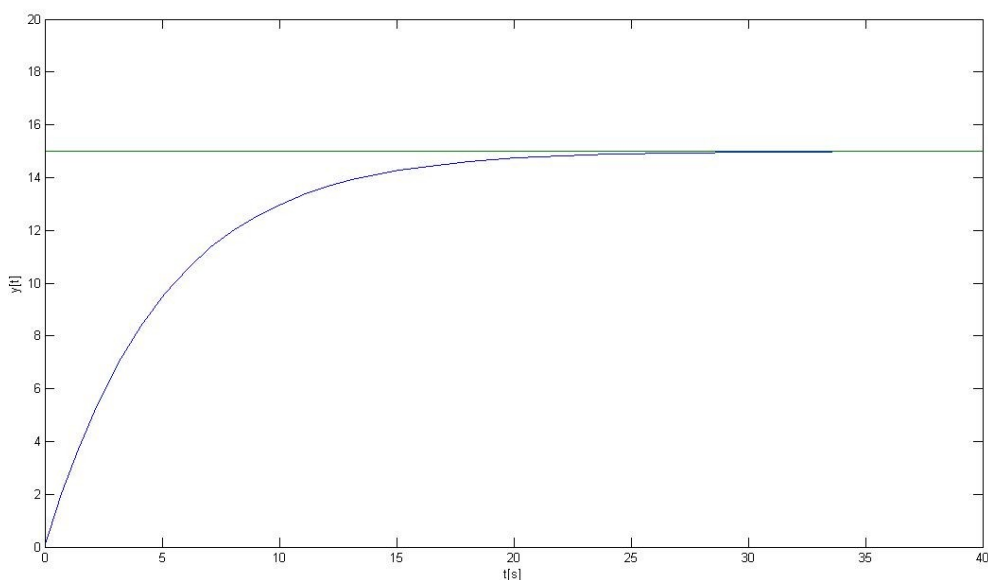


Obr. 25 – Simulační model pro ověření návrhu regulátoru

#### Popis bloků simulačního modelu

**Sum** – Blok pro realizaci matematických operací (sčítání, odčítání).

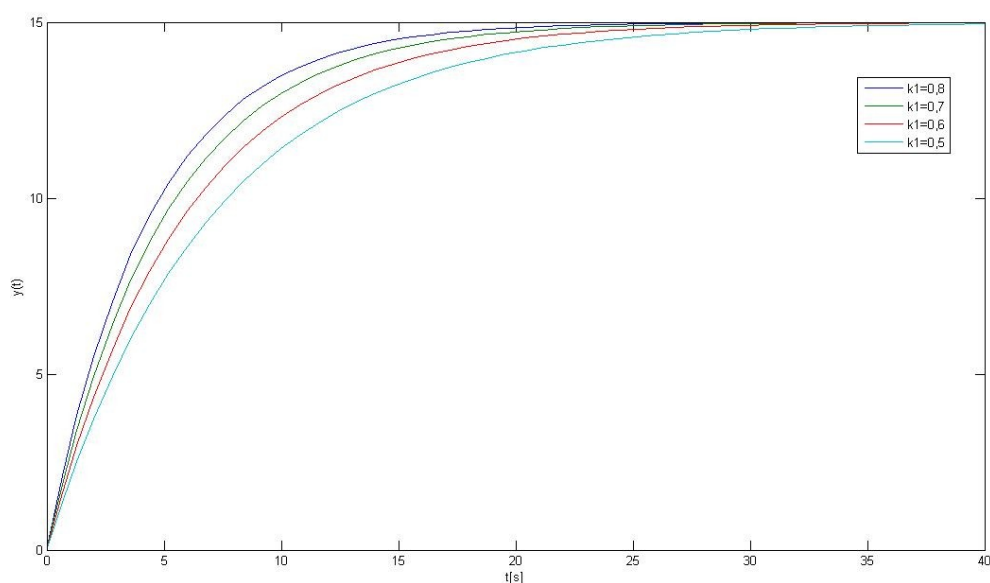
**Gain** – Realizace P regulátoru.



Obr. 26 – Číslicová simulace regulace

Tab. 4. – Přenosy regulátorů a kvalita regulačního pochodu pro model regulace polohy.

Metoda syntézy, typ regulátoru	Požadovaného modelu, P
Přenos regulátoru	$G_R(s) = 1,43$
Překmit [%]	0
Doba regulace [s]	32
Absolutní regulační plocha	74,92

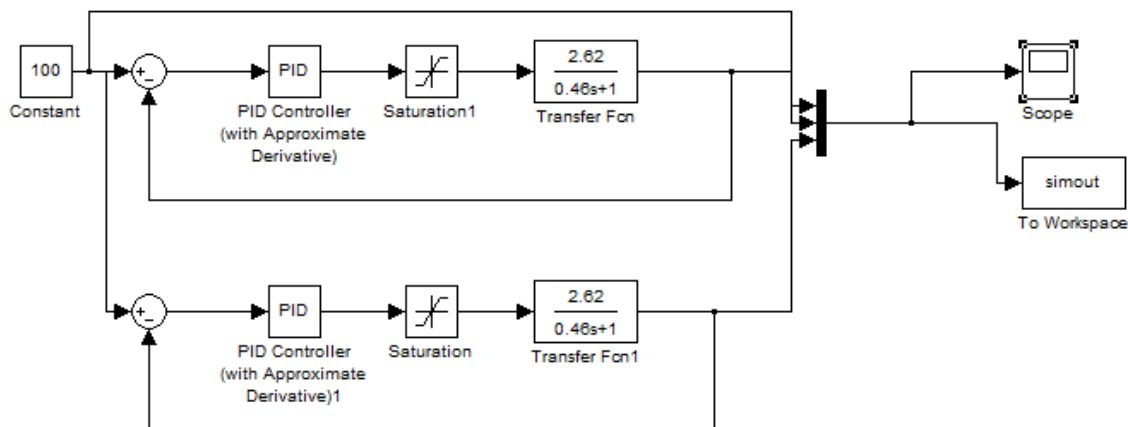


Obr. 27 – Číslicová simulace regulace pro matematické modely viz. Tab. 1.

Na Obr. 26 je vidět průběh regulované veličiny pro seřazený regulátor typu P metodou požadovaného modelu. Regulátor je navržen pro soustavu ve tvaru  $G_s(s) = \frac{0,7}{s}$ . Na Obr. 27 jsou pak vidět průběhy regulované veličiny ostatních matematických modelů z Tab. 1. Regulační pochod, který je řízený vždy stejným regulátorem typu P, je vždy bez překmitu a trvalé regulační odchylky.

## Model regulace průtoku

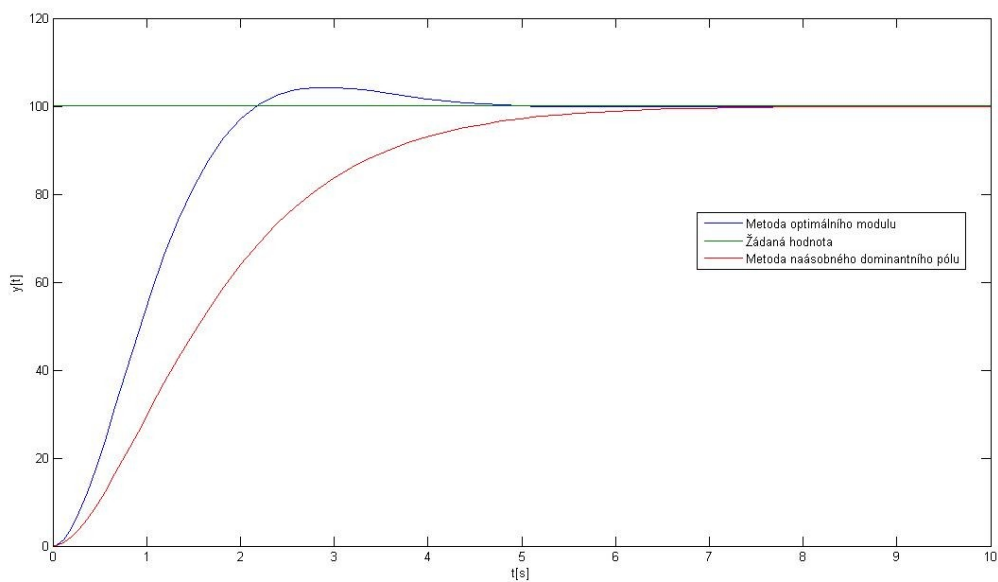
Simulace pro získaný přenos bez dopravního zpoždění  $G_s(s) = \frac{2,62}{0,46s+1}$



Obr. 28 - Simulační model pro ověření návrhu regulátoru soustavy bez dopravního zpoždění

### Popis bloků simulačního modelu

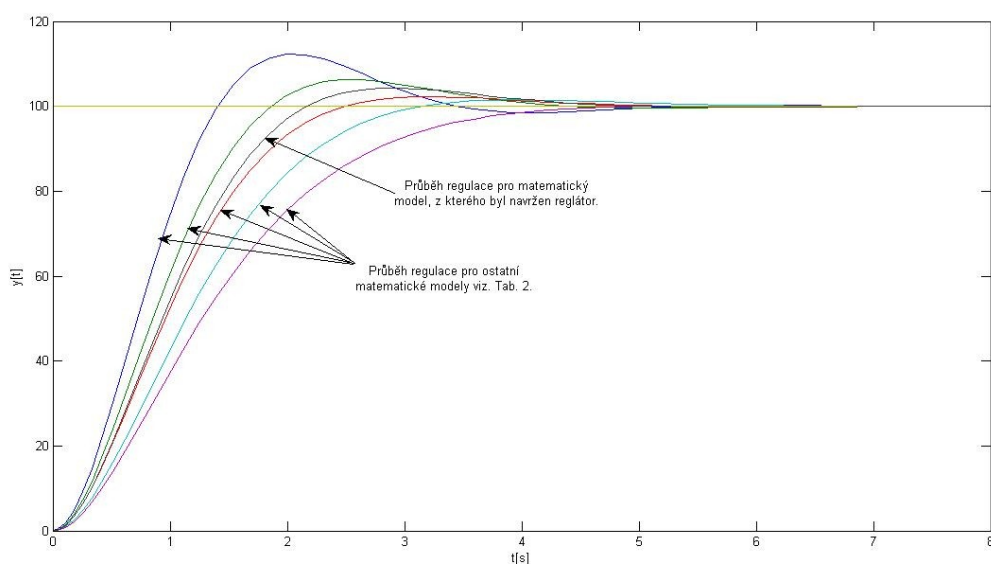
**PID** – Blok pro nastavení přenosu regulátoru.



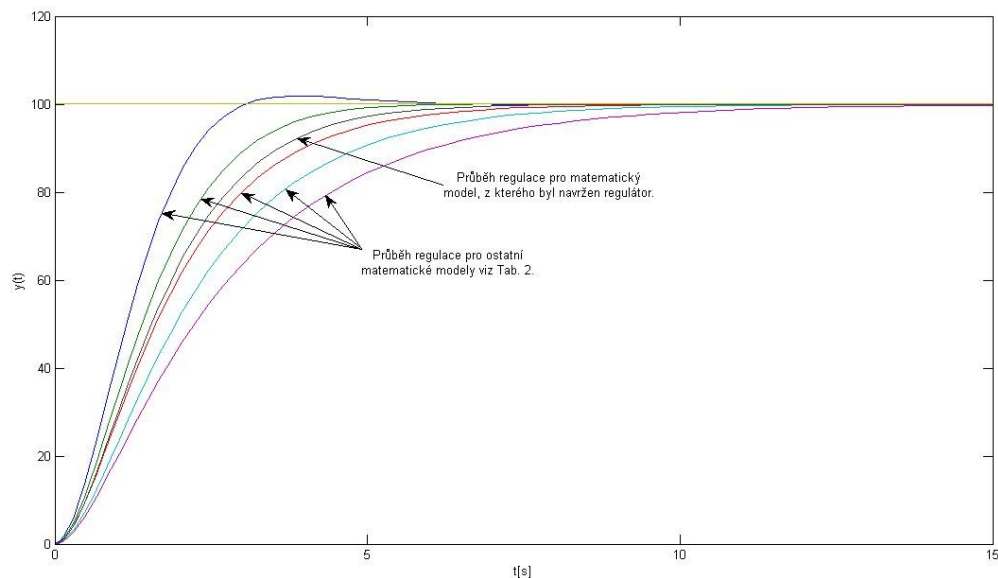
Obr. 29 – Číslíková simulace regulace soustavy bez dopravního zpoždění

Tab. 5. - Přenosy regulátorů a kvalita regulačního pochodu pro model regulace průtoku

Metoda syntézy, typ regulátoru	Optimálního modulu, I	Násobného dominantního pólu, I
Přenos regulátoru	$G_R(s) = \frac{1}{2,41s}$	$G_R(s) = \frac{1}{4,82s}$
Překmit [%]	4	0
Doba regulace [s]	7,5	9
Absolutní regulační plocha	104,9	183,9



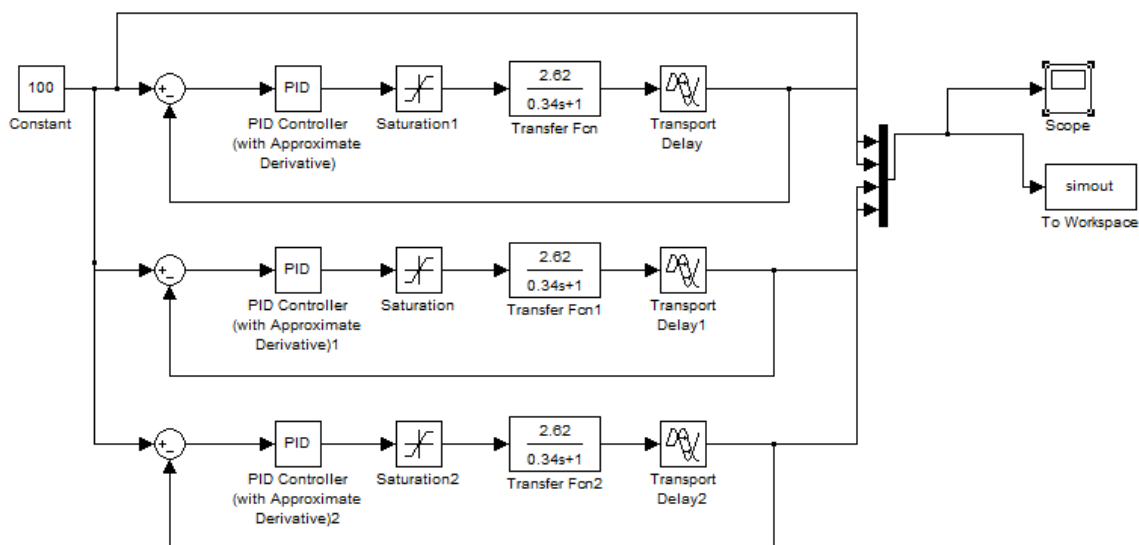
Obr. 30 - Číslicová simulace regulace pro matematické modely viz. Tab. 2. seřízené metodou optimálního modulu.



**Obr. 31 - Číslicová simulace regulace pro matematické modely viz. Tab. 2. seřízené metodou násobného dominantního pólu.**

Na Obr. 29 jsou vidět průběhy regulované veličiny pro seřízené regulátory typu I metodou optimálního modulu a metodou násobného dominantního pólu. Regulátory jsou navrženy pro soustavu ve tvaru  $G_s(s) = \frac{2,62}{0,46s+1}$ . Obě metody poskytují regulaci s nulovou trvalou regulační odchylku. Regulátor navržený metodou násobného dominantního pólu, reguluje bez překmitu. Metoda optimálního modulu dává překmit, který je ale do 5%. Na Obr. 30 a 31 jsou zobrazeny průběhy regulované veličiny pro soustavy viz Tab. 2. Tady je vhodnější metodou metoda násobného dominantního pólu. Regulace je závislá na velikosti zesílení  $k_I$  soustavy, proto při větším zesílení může dojít k překmitu. V tomto případě je ale překmit do 5%.

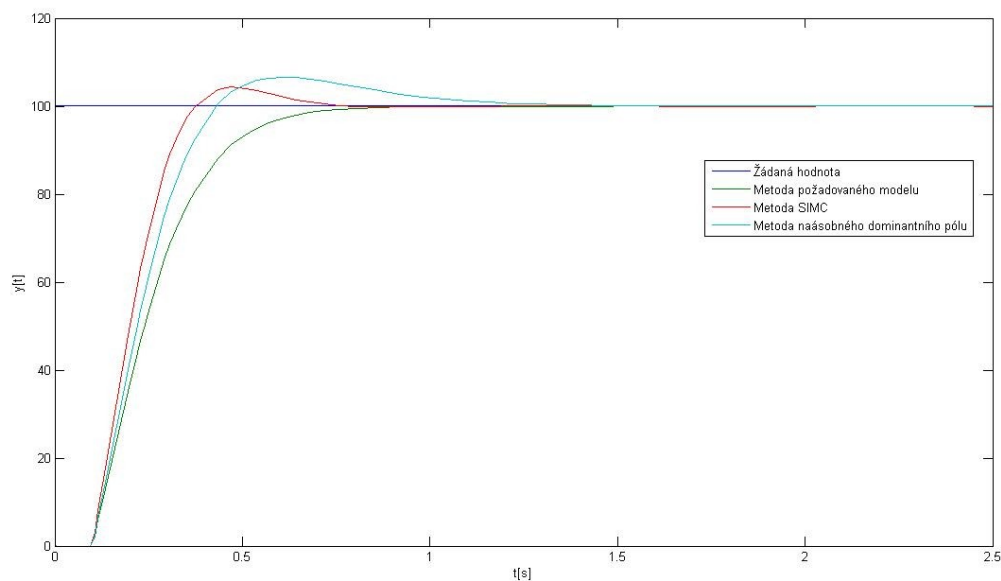
Simulace pro získaný přenos s dopravním zpožděním  $G_s(s) = \frac{2,62}{0,34s+1} e^{-0,1}$



Obr. 32 - Simulační model pro ověření návrhu regulátoru soustavy s dopravním zpožděním

### Popis bloků simulačního modelu

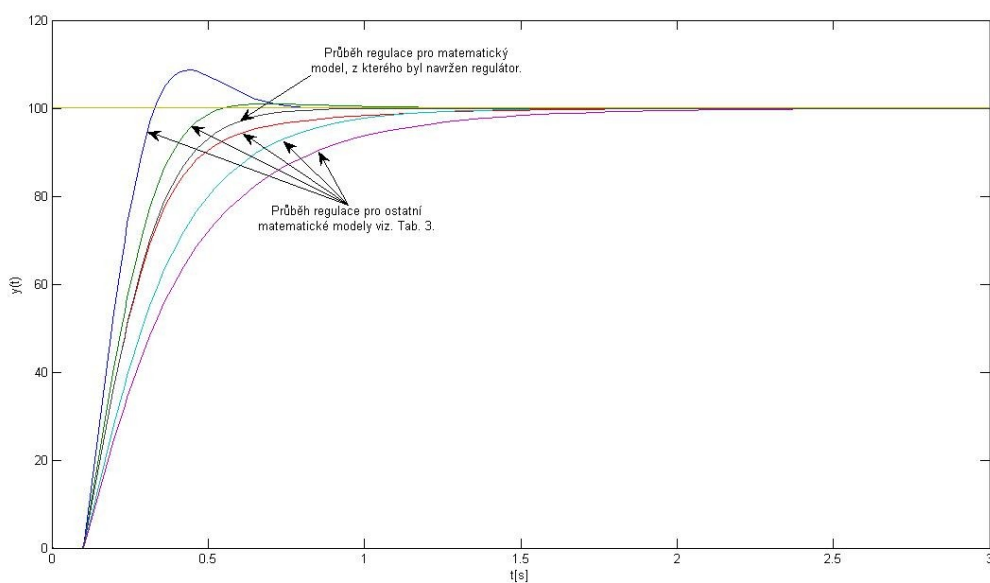
Transport delay – dopravní zpoždění soustavy.



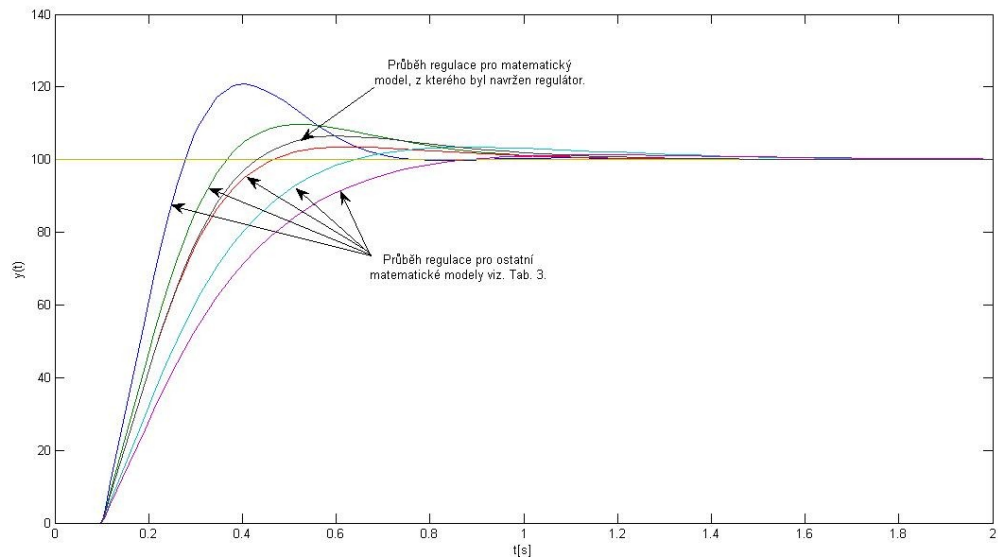
Obr. 33 - Číslicová simulace regulace soustavy s dopravním zpožděním

Tab. 6. - Přenosy regulátorů a kvalita regulačního pochodu pro model regulace průtoku

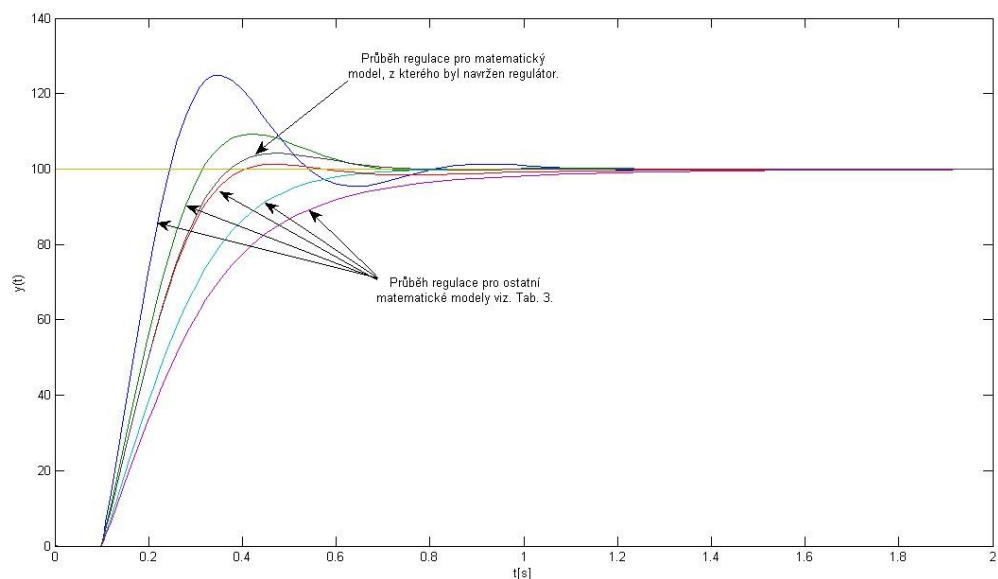
Metoda syntézy, typ regulátoru	Požadovaného modelu, PI	SIMC, PI	Násobného dominantního pólu, PI
Přenos regulátoru	$G_R(s) = 0,48 \left(1 + \frac{1}{0,34s}\right)$	$G_R(s) = 0,65 \left(1 + \frac{1}{0,34s}\right)$	$G_R(s) = 0,53 \left(1 + \frac{1}{0,28s}\right)$
Překmit [%]	0	4	6,5
Doba regulace [s]	1,2	1,2	2
Absolutní regulační plocha	27,04	21,74	25,97



Obr. 34 – Číslicová simulace regulace pro matematické modely viz. Tab. 3. seřízené metodou požadovaného modelu.



**Obr. 35 – Číslicová simulace regulace pro matematické modely viz. Tab. 3. seřízené metodou násobného dominantního pólu.**



**Obr. 36 - Číslicová simulace regulace pro matematické modely viz. Tab. 3. seřízené metodou SIMC.**

Na Obr. 33 jsou vidět průběhy regulované veličiny řízené regulátory typu PI. Regulátory jsou navrženy pro soustavu ve tvaru  $G_s(s) = \frac{2,62}{0,34s+1} e^{-0,1s}$  a seřízeny metodami požadovaného modelu, násobného dominantního pólu a metodou SIMC. Všechny metody poskytují regulaci s nulovou trvalou regulační odchylkou. Regulátor navržený metodou násobného dominantního pólu dává největší překmit okolo 6,5% a také doba regulace je větší proti metodám požadovaného modelu a SIMC. Regulátor seřízený metodou požadovaného modelu byl seřízen tak, aby poskytoval regulaci bez překmitu. Na Obr. 34 – 36 jsou



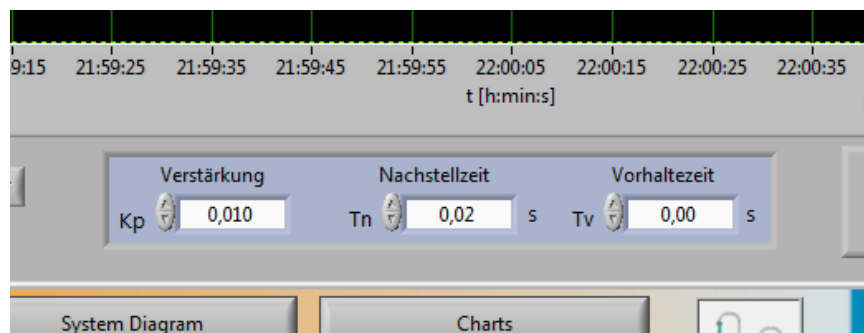
zobrazeny průběhy regulované veličiny pro soustavy z Tab. 3. Nejlepší hodnoty regulace poskytuje metoda požadovaného modelu. Regulace je závislá na hodnotě zesílení  $k_I$ . Pro větší hodnotu zesílení se musí navrhnout jiné stavitelné parametry regulátoru, aby byl regulační pochod bez překmitu.

### 3.3 Ověření navržených regulátorů na laboratorním modelu

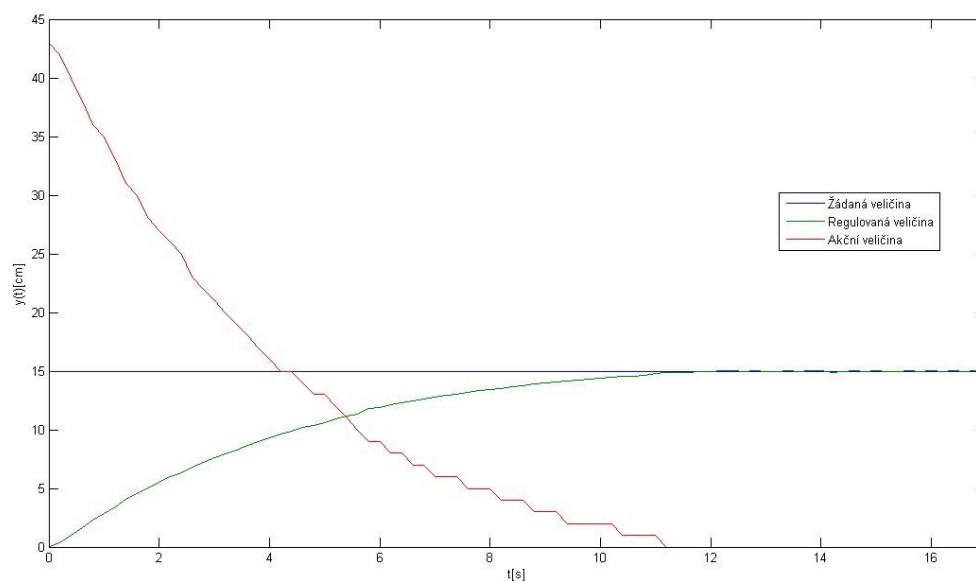
Ověření bylo provedeno přímo na laboratorních modelech za pomoci dodaného řídicího softwaru *RT 010 – Základy techniky řízení*. Stavitelné parametry regulátorů se vkládají do buněk, viz. Obr. 31. Jednotlivým parametrům  $k_p$ ,  $T_I$  a  $T_D$  *PID* regulátoru odpovídají buňky  $k_p$ ,  $T_n$  a  $T_v$ . Z důvodu, že hodnoty políček odpovídají *PID* regulátoru s přenosem

$$G_R(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (40)$$

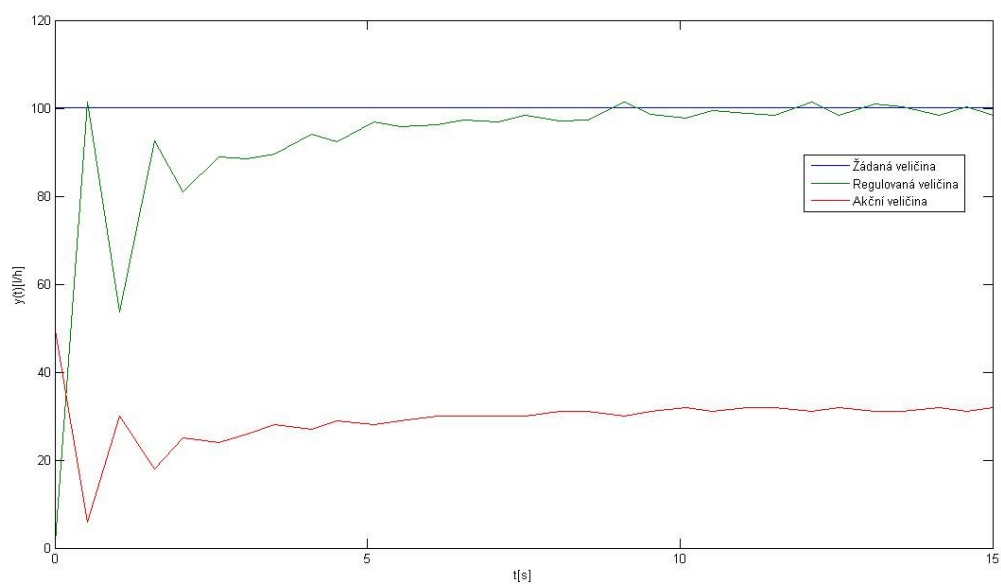
je možno realizovat pouze *P*, *PI*, *PD* a *PID* regulátor. Proto nebyla na modelu ověřena správnost navržených *I* regulátorů.



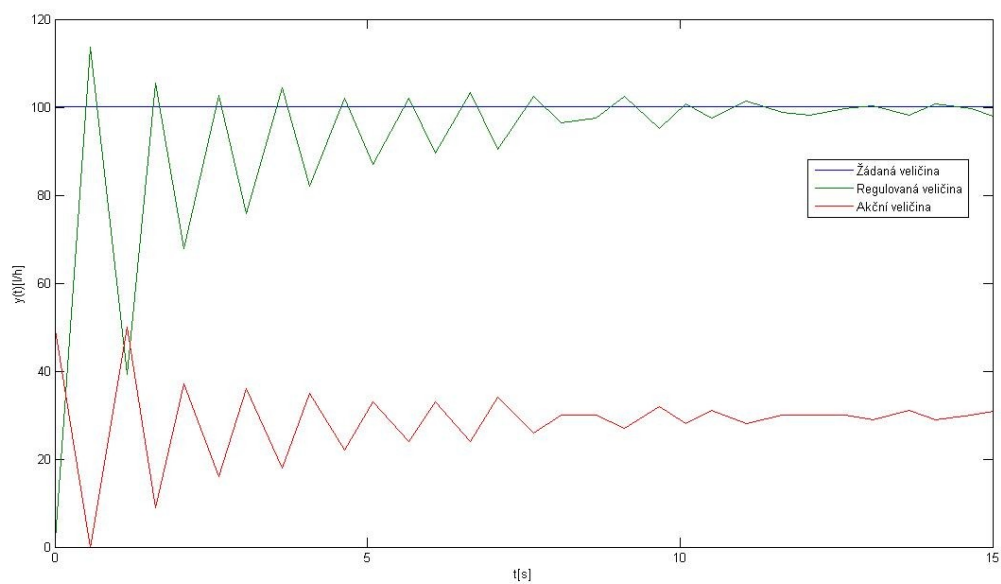
Obr. 37 – Pole pro vkládání stavitelných parametrů *PID* regulátoru v okně – Charts.



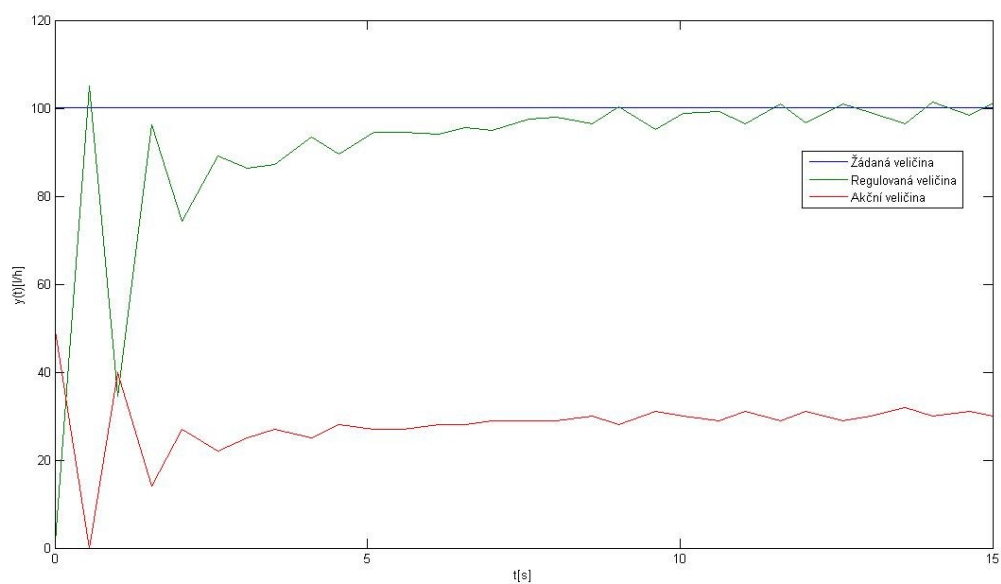
Obr. 38 - Průběh regulace polohy při seřízení metodou požadovaného modelu.



Obr. 39 - Průběh regulace průtoku při seřízení metodou požadovaného modelu.



**Obr. 40 - Průběh regulace průtoku při seřízení metodou SIMC.**



**Obr. 41 – Průběh regulace průtoku při seřízení metodou násobného dominantního pólu.**

## 4 Úlohy k samostatné práci studentů

Cílem těchto úloh je seznámení studentů se základními principy měření a regulace. Studenti si vyzkouší měřit a vyhodnocovat statickou a přechodovou charakteristiku. Dále pak navrhovat konvenční regulátory a správnost jejich navržení otestovat přímo na modelech.

### Na laboratorním modelu regulace polohy RT 060:

- 1) Popište daný model.
- 2) Změřte přechodovou charakteristiku.
  - a) Zvolte manuální ovládání.
  - b) Nastavte jezdce do polohy 0 cm.
  - c) Přechodovou charakteristiku změřte pro 10; 50 a 100% akční veličiny.
  - d) Velikosti akční veličiny nastavujte vždy z výchozí polohy 0 cm.
  - e) Naměřená data uložte po každém ze tří měření přechodové charakteristiky.
  - f) Vykreslete všechny přechodové charakteristiky.
- 3) Zhodnoťte dosažené výsledky.

### Na laboratorním modelu regulace polohy RT 060:

- 1) Popište daný model.
- 2) Soustava je popsána přenosem  $G_s(s) = \frac{0,7}{s}$ . Vhodnou metodou syntézy navrhnete regulátor a určete jeho stavitelné parametry.
- 3) Správnost navrženého regulátoru ověřte na laboratorním modelu.
  - a) V řídicím softwaru zvolte regulované řízení (continuous control).
  - b) Vložte stavitelné parametry regulátorů.
  - c) Regulaci proveďte z počáteční polohy 0 cm na polohu 20 cm.
  - d) Uložte a následně vykreslete regulační pochod.
- 4) Zhodnoťte dosažené výsledky.

**Na laboratorním modelu regulace průtoku kapaliny RT 020:**

- 1) Popište daný model.
- 2) Změřte statickou charakteristiku
  - a) Zvolte manuální ovládání.
  - b) Postupně nastavujte procentuální velikost akční veličiny s krokem 10% (tj.: 10; 20; ... ; 100%).
  - c) Ustálené stavy zapisujte do tabulky.
  - d) Vykreslete statickou charakteristiku.
- 3) Zhodnoťte dosažené výsledky.

**Na laboratorním modelu regulace průtoku kapaliny RT 020:**

- 1) Popište daný model.
- 2) Soustava je popsána přenosem  $G_s(s) = \frac{2,62}{0,46s+1}$ . Vhodnou metodou syntézy navrhnete regulátor a určete jeho stavitelné parametry.
- 3) Správnost navrženého regulátoru ověřte na laboratorním modelu.
  - a) V řídicím softwaru zvolte regulované řízení (continuous control).
  - b) Vložte stavitelné parametry regulátorů.
  - c) Regulaci proveďte z hodnoty průtoku 0 l/h na hodnotu 150 l/h.
  - d) Uložte a následně vykreslete regulační pochod.
- 4) Zhodnoťte dosažené výsledky.

## 5 Zhodnocení

Tato práce se zabývala analýzou a syntézou laboratorních modelů regulace polohy a regulace průtoku kapaliny. U modelů bylo popsáno jejich hardwarové a softwarové vybavení. Dále byl také popsán princip, na kterém pracují.

Pomocí vybraných metod experimentální identifikace byly z přechodových charakteristik zjištěny matematické modely obou laboratorních modelů pro jednotlivé průběhy velikosti akční veličiny. Správnost získaných matematických modelů soustav byla simulačně ověřena v programu Matlab/Simulink a následně graficky vyhodnocena.

Syntéza pro model regulace polohy byla provedena jednou metodou, a to metodou požadovaného modelu, již byl získán P regulátor. Pro model regulace průtoku byla syntéza provedena jak pro získaný matematický popis bez dopravního zpoždění metodami optimálního modulu a násobného dominantního pólu, tak pro matematický popis s dopravním zpožděním metodou požadovaného modelu a metodami SIMC a násobného dominantního pólu. Pro tento model byly navrženy regulátory I a PI. Správnost navržení regulátorů byla ověřena pomocí číslicové regulace (simulace) v programu Matlab/Simulink. Bylo provedeno ověření regulátorů přímo na laboratorním modelu. U modelu regulace průtoku byly na modelu ověřeny pouze PI regulátory, protože v řídicím softwaru neleze I regulátor realizovat.

Regulátor typu P, který byl navržen pro model regulace polohy, reguluje vždy bez překmitu a trvalé regulační odchylky. Všechny seřizené PI regulátory pro model regulace průtoku získané pomocí použitých metod syntézy jsou vhodné pro regulaci soustavy. Z hlediska překmitu je nejvhodnější metoda požadovaného modelu. Z hlediska doby regulace jsou pak vhodné metody násobného dominantního pólu a požadovaného modelu. Průběh simulace proti skutečné regulaci u modelu regulace průtoku se liší v hladkosti průběhu regulačního pochodu. Důvodem je plovoucí vzorkovací perioda, která se pohybuje v rozmezí od 0,4 do 0,7 sekund.

Na konec byly navrženy čtyři úlohy pro samostatnou práci studentů v předmětu Základy automatizace. Cílem těchto úloh je seznámení studentů se základními principy měření a regulace. Studenti si vyzkouší měřit a vyhodnocovat statickou a přechodovou charakteristiku. Dále pak navrhovat konvenční regulátory a správnost jejich návrhu otestovat přímo na modelech.

Z důvodu, že laboratorní model regulace průtoku má velkou vzorkovací periodu a v řídicím softwaru obou modelů nelze realizovat I regulátor, navrhoval bych jako další krok k řešení těchto problémů, připojení modelů k PC přes měřicí karty a jejich řízení přímo v prostředí Matlabu nebo Labview.

## Seznam odborné literatury

BALÁTĚ, J. *Automatické řízení*. Praha: Nakladatelství BEN, 2003, 654 s. ISBN 80-7300-020-2.

DORF, R. C. & BISHOP, R. H. *Modern Control Systems*. Addison-Wesley: Harlow England 1998. ISBN 0-201-30864-9.

HIKL, J. *Návrh regulátorů pro soustavy s dopravním zpožděním*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2008. 58 str. Bakalářská práce, vedoucí: Vítečková, M.

LOS, J. *Analýza a syntéza vybraného technologického procesu*. Ostrava: katedra automatizační techniky a řízení, VŠB-TU Ostrava, 2007. Bakalářská práce, vedoucí: Wagnerová, R.

NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systému*. Ostrava: Vydavatelství MONTANEX a.s. 1999. 276 s. ISBN 80-7225-030-2.

ŠULC, B. *Teorie automatického řízení s počítačovou podporou*. Praha: ČVUT, 1999. 153 str. ISBN 80-01-01974-B.

VÍTEČKOVÁ, M., VÍTEČEK, A. *Základy automatické regulace*. 2. přepracované vydání. Skripta FS VŠB-TU Ostrava, 246 str. 2008. ISBN 978-80-248-1924-2.

GUNT, *RT 060 Training system: Position control*. Manuál.

GUNT, *RT 020 Training system: Position control*. Manuál.

GUNT, *RT 010 – RT 060 Experiments in the fundamentals of control*. Manuál.